

*В. А. Толвинский*

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ  
МАШИНЫ  
ПОСТОЯННОГО  
ТОКА



*Лескертуйн дэхи*

В. А. ТОЛВИНСКИЙ

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
МОСКВА 1956 ЛЕНИНГРАД



Научный редактор — доктор технических наук,  
профессор *Д. А. Завалишин*

*В книге излагаются основные вопросы теории электрических машин постоянного тока. Описываются наиболее характерные свойства этих машин и указываются методы их испытания. Вместе с тем даются необходимые сведения о практическом применении электрических машин постоянного тока.*

*Книга рассчитана на инженеров-электриков, имеющих дело с электрическими машинами постоянного тока, и на студентов энергетических и электротехнических вузов и факультетов.*

Автор *Толвинский Вацлав Александрович*  
«Электрические машины постоянного тока»

Редактор *А. С. Уссер*

Технический редактор *А. А. Забродина*

---

Сдано в произв. 26/XII 1955 г.	Подписано к печати 26/V 1956 г.	М-09708.
Печ. л. 40.	Бум. л. 14,63.	Уч.-изд. л. 37,5. 70×108 <sup>1</sup> / <sub>16</sub> .
Тираж 10 000.	Цена 20 р. 25 к. в коленкор. пер. и 19 р. 75 к. в простом.	Заказ 1190.

---

Типография «Красный Печатник». Ленинград, проспект имени И. В. Сталина, 91.

## ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА

Со времени издания фундаментального труда В. А. Толвинского «Электрические машины постоянного тока», том I (основные вопросы теории) прошло уже четверть века.

Хорошо продуманная, оригинальная методика изложения электрических машин постоянного тока, исключительная глубина и доходчивость книги поставили ее на одно из первых мест среди соответствующих курсов электрических машин.

В. А. Толвинский предполагал продолжить работу над курсом и издать не только второй том курса машин постоянного тока, посвященный дополнительным вопросам теории, расчету и конструкции, но и ряд томов, в которых были бы рассмотрены электрические машины переменного тока.

Изданию намечавшегося второго тома «Машин постоянного тока», а также полного курса электрических машин не суждено было осуществиться. В 1927 г. В. А. Толвинский взял на себя главную часть труда по организации издания «Справочной книги для электротехников» («СЭТ»), первоначально намечавшейся в объеме двух томов по 50 печатных листов каждый, но превратившейся затем в шеститомное издание общим объемом около 300 печатных листов. При этом том пятый и подавляющая часть шестого тома, посвященные электрическим машинам, были написаны преимущественно В. А. Толвинским. Тем самым В. А. Толвинский в известной степени компенсировал невыполненное намерение издать полный курс электрических машин. Большая работа по «СЭТ» была закончена в 1934 г.

Второй причиной, отвлекшей В. А. Толвинского от написания курса электрических машин, было участие в строительстве Днепровской гидроэлектрической станции в должности помощника начальника технического отдела Днепростроя. При этом на его долю выпало руководство проектами электрической части Днепростроя, наблюдение за их практическим осуществлением в натуре, пуск в ход первой очереди сооружений и участие в наладке эксплуатации.

С 1932 по 1938 г. В. А. Толвинский принимал участие в разрешении электротехнических вопросов в проектных организациях, занимавшихся проектированием гидростанций; в частности, под его руководством, в сотрудничестве с проф. А. А. Вульфом и проф. А. А. Горовым, был разработан первый проект электропередачи Куйбышев — Москва, давший возможность включить эту грандиозную установку в план третьей пятилетки (см. «Электричество», 1937, № 12).

Собственно к вопросам электрических машин В. А. Толвинский вернулся лишь в 1939 г., причем в 1941 г. он согласился взять на себя составление на базе пятого и шестого томов «СЭТ» «Справочной книги по электрическим машинам» («СЭМ»); эта работа была прервана наступлением второй мировой войны. Война унесла почти всех, выращенных В. А. Толвинским и привлеченных к этой работе талантливых сотрудников, что лишило его возможности продолжить эту работу после окончания войны.

Несмотря на это, а также на свое болезненное состояние, В. А. Толвинский решил переработать книгу по электрическим машинам постоянного тока



и посвятил этой работе то время, которое у него оставалось от основных служебных обязанностей.

Будучи исключительно требовательным к себе, В. А. Толвинский не оставил без переработки ни одного раздела книги. К началу 1952 г. переработка эта, вылившаяся по существу в написание новой книги, была в основном закончена. Рукопись была передана на просмотр начальнику отдела электрических машин постоянного тока завода «Электросила» инж. И. Н. Рабиновичу, который сделал ряд ценных замечаний и предложений. Все эти предложения В. А. Толвинский предполагал учесть при окончательной обработке рукописи перед сдачей ее в печать. Резко ухудшившееся состояние здоровья не позволило ему, однако, выполнить эту работу.

16 августа 1952 г. В. А. Толвинский скончался, оставив незаконченным свой труд по электрическим машинам постоянного тока.

Ввиду большой ценности рукописи В. А. Толвинского представлялось необходимым довести до конца этот труд. Автор этих строк взял на себя дальнейшее редактирование рукописи и подготовку ее к печати.

Предварительный просмотр рукописи И. Н. Рабиновичем чрезвычайно облегчил редактору его работу. Замечания И. Н. Рабиновича редактором были полностью учтены.

Помимо этого редактором были внесены в материал рукописи некоторые изменения в части приближения терминологии рукописи к общепринятой. В то же время редактор стремился по возможности не вносить в рукопись изменений и дополнений. Лишь те разделы, которые были явно недоработаны В. А. Толвинским из-за его болезненного состояния, подверглись дополнительной доработке. В частности, пришлось написать заново § 161 и 162, касающиеся явления кругового огня и щеток, применяемых в динамострое-нии. Никаких новых разделов редактор в рукопись не вносил. Ввиду этого в книге отсутствует, например, раздел электрических машин постоянного тока с поперечным магнитным полем.

Труд В. А. Толвинского не следует, однако, рассматривать, как полный курс электрических машин постоянного тока; ценность книги прежде всего в том, что она основана на оригинальной, единообразной и глубоко научной методике изложения электрических машин постоянного тока. Всякое внесение нового материала другим автором могло бы нарушить эту методику.

Своими большими трудами в области электрических машин В. А. Толвинский завоевал почетное место среди ученых-электриков. Настоящей книгой, представляющей собой его последний труд, В. А. Толвинский внес еще один ценный вклад в отечественную электротехнику.

Работа по редактированию книги и подготовке ее к печати выполнена при большом участии канд. техн. наук А. С. Уссера и инж. Е. В. Толвинской. Необходимо также отметить помощь инж. Ф. С. Гланц при подборе чертежей электрических машин и их деталей. Всем им редактор выражает искреннюю благодарность.

*Д. Завалишин*

---

---

## ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА

Настоящая книга, посвященная электрическим машинам постоянного тока, формально представляет собой 3-е, переработанное издание книги, выпущенной первым литографированным изданием в 1925 г. с пометкой: «Выпуск I. Теория», и 2-м печатным изданием 1929 г., обозначенным: «Том I. Основные вопросы теории». Однако, по ряду причин, автор воздерживается ныне от этого указания.

Двадцать с лишним лет, прошедших со времени выхода второго печатного издания одноименной книги того же автора, явились причиной того, что настоящая книга по компоновке материала настолько отличается от второго, печатного, издания, что, по существу, представляет собой книгу заново написанную как бы другим человеком.

Прежде всего, автор отказался ныне от выпуска предполагавшегося ранее второго тома книги, посвященного дополнительным теоретическим главам, расчету и конструкции электрических машин постоянного тока. По расчету и конструкции всех электрических машин имеются в настоящее время специальные книги, поэтому, посвящая свою книгу теории и испытанию машин постоянного тока, автор затронул эти вопросы лишь в мере, необходимой для содержания книги.

Автор пересмотрел и вопрос о дополнительных теоретических главах, включив из них в книгу лишь небольшое число их, необходимых для цельности изложения теории. По мнению автора, не включенные в книгу дополнительные теоретические вопросы (как, например, по коммутации и по переходным процессам) следует отнести к специальным монографиям.

Всякую техническую книгу ныне принято начинать с исторического введения. Наличие в книге сведений об историческом развитии конкретной дисциплины безусловно необходимо, так как приступающий к ней должен отдавать себе отчет, что он приступает к дисциплине на определенной стадии ее развития и должен иметь представление как о пройденных этапах, так и о перспективах дальнейшего развития, чтобы воспринимать сообщаемые сведения не догматически, а критически, осмысленно. Однако помещать такой исторический обзор во введении нецелесообразно, ибо у приступающего к изучению его еще нет знания ни терминологии, ни конструктивных выполнений машин постоянного тока. Такое историческое введение сводится поэтому обычно к перечню трудно воспринимаемых фактов и перечню имен с воздаванием им по заслугам; от прочтения такого введения у читателя могут остаться в памяти лишь несвязные обрывки, быстро улетающие. Настоящее преподнесение и соответствующее усвоение исторического развития дисциплины возможно лишь на базе уже изученного конкретного материала. По этой причине «Историческое развитие электрических машин и их практического применения» мы поместили не во введении, а в послесловии к книге, что позволило при изложении пользоваться и терминологией электрических машин и их конструктивными особенностями. В самой же книге, в отдельных главах, посвященных определенным вопросам, автор ограничился кратким приведением конкретных исторических фактов и упоминанием имен



деятелей в данной области. Насколько успешно справился автор с этой задачей, покажет критика, но постановка вопроса нам представляется правильной.

Обычно курсы машин постоянного тока ограничиваются рассмотрением ныне общепринятого коллекторного типа, а после, без всякой связи, сообщаются, или вовсе не сообщаются, сведения о выполнении некоторых других типов. Такое рассмотрение создает у изучающего электрические машины постоянного тока известную неудовлетворенность, — чего-то, самого важного, ему не сообщили... Поэтому нам представляется желательным начинать введение к машинам постоянного тока с электрических машин вообще, показав их во всем многообразии возможностей и отметив место, занимаемое в этом многообразии ныне общепринятым коллекторным типом машины постоянного тока.

Современная машина постоянного тока является, по преимуществу, коммутируемой машиной постоянного тока, т. е. ее неотъемлемой частью являются добавочные полюсы. Этот перелом, происшедший в оценке добавочных полюсов, должен в настоящее время быть надлежащим образом оцененным и подчеркнутым, в связи с чем и коммутация тока в машинах постоянного тока должна рассматриваться, прежде всего, как коммутация в машинах постоянного тока с добавочными полюсами, благодаря чему она получает надлежащую четкость и направленность.

В то же самое время современная машина постоянного тока является электрической машиной, отвечающей общим установкам в машиностроении — стремлению к возможно лучшему использованию материалов; этой цели способствует применение усиленной вентиляции, поэтому проблема вентиляции, увязанная с проблемой нагревания машины постоянного тока, должна занимать в теории машин постоянного тока подобающее, равноправное место с проблемами электромагнитных явлений. В курсе машин постоянного тока должны подчеркиваться также и другие актуальные проблемы общего машиностроения, в частности, технологичность конструкций. Разбор этих вопросов, конечно, не может быть дан, они непосредственно относятся к курсу конструкции электрических машин, но указание на их важность должно быть, ибо нельзя забывать, что электрическая машина — прежде всего машина и должна удовлетворять требованиям, предъявляемым к машинам вообще.

Краткое содержание отдельных глав и их взаимосвязь, что весьма важно для приступающих к изучению книги, даны в гл. I (§ 32). В расположении материала сделано отступление от общепринятой традиции и после описания конструктивного выполнения главнейших деталей машины постоянного тока (гл. I) дается расчет главной магнитной цепи электрической машины при холостом ходе (гл. II), а затем уже следуют гл. III и IV — о якорных обмотках. Такое, обратное общепринятому, расположение этих глав имеет, на наш взгляд, несомненное преимущество. Расчет магнитной цепи при холостом ходе машины в настоящее время принял такую четкость, что усваивается легко, чего нельзя сказать об якорных обмотках, остающихся наиболее трудным разделом теории машин постоянного тока, не считая теорию коммутации тока. Теория обмоток, которой автор на протяжении своей деятельности уделил много внимания, излагается в интерпретации, дающей нужную наглядность и убедительность, но требующей значительного времени и места, что, однако, как показал опыт автора, окупается более легким усвоением. Подробнее автор мотивировал это в предисловии ко второму изданию книги. Здесь лишь укажем, что разделы А — Г гл. III имеют чисто пропедевтический характер, — уяснение свойств и особенностей отдельных типов обмоток. То, что относится к ныне применяемым двуслойным обмоткам зубчатого барабанного якоря и подлежит усвоению и запоминанию, дается в следующей гл. IV и занимает относительно небольшой объем, легко усваиваемый после ознакомления с разделами А — Г гл. III

При изложении отдельных вопросов автор ориентировался на принятую на заводе «Электросила» методику расчета машин постоянного тока. Однако строго выдержать эту установку не удалось. В заводской расчетной практике расчетным формулам часто придают вид, наиболее быстро дающий результат, но при этом нередко теряется наглядность формулы, что в книге нежелательно. Ознакомившемуся с этой книгой не доставит особого труда перейти в практической работе к заводским формулам.

Большое значение автор придает вопросу о выборе символов для обозначения отдельных величин. За время своей работы автор немало способствовал установлению некоторого единообразия в этой области, но в последнее время усилилось стремление к введению русского алфавита для индексов. Автор считает, что это ничем не оправдано и придерживается прежней установки: 1) при крайне ограниченном числе букв латинского и греческого шрифтов, введенных во всеобщее употребление, обойтись без индексов невозможно, 2) символ с индексом является своеобразным символом и должен быть изображен общепринятыми буквами (латинскими или греческими), 3) индекс, по возможности, должен быть однозначным (одна буква), иногда двузначным, но не более обширным.

1951 г.

---



## ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие редактора . . . . .	3
Предисловие автора . . . . .	5

## ВВЕДЕНИЕ

А. Об электрических машинах и их терминологии . . . . .	17
1. Общепринятое подразделение эл. машин . . . . .	—
2. Связь между эл. машинами и эл. трансформаторами . . . . .	—
3. О некоторых исходных терминах . . . . .	19
4. Об электротехнических терминах и их сокращениях . . . . .	21
Б. Об энергопреобразовательном процессе в эл. машинах . . . . .	—
5. Об осуществлении в эл. машине энергопреобразовательного процесса . . . . .	—
6. Энергетическая обратимость эл. машины . . . . .	22
7. О характере движения, используемого в эл. машине . . . . .	—
8. О прямом и косвенном использовании эл. машины . . . . .	—
В. Подразделение эл. машин по внешним признакам . . . . .	24
9. Подразделение эл. машин по признакам, вытекающим из определения эл. машины . . . . .	—
10. Подразделение эл. машин по кинематическим признакам и по конфигурациям ротора . . . . .	—
11. Кинематическая обратимость эл. машины . . . . .	27
12. Подразделение эл. машин по системам эл. тока и по числу проводящих связей . . . . .	—
Г. Подразделение эл. машин по внутренним признакам . . . . .	28
13. Подразделение эл. машин по числу якореЙ . . . . .	—
14. Подразделение эл. машин по выполнению роторного скользящего эл. контакта . . . . .	—
15. Об электрической конструктивной обратимости эл. машины . . . . .	29
16. Подразделение эл. машин по родам преобразуемой ими эл. энергии . . . . .	—
Д. Возможные типы эл. машин постоянного тока и их практическое значение . . . . .	30
17. Особенности эл. машин постоянного тока . . . . .	—
18. Простейшая конструктивная схема эл. машины постоянного тока и ее модификации . . . . .	31
19. О физической невозможности эл. машин постоянного тока без скользящих эл. контактов . . . . .	33
20. Практическое значение отдельных типов эл. машин постоянного тока . . . . .	—

## Глава I

### СОВРЕМЕННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

А. Сведения общего характера . . . . .	34
21. Главные составные части и главные детали машин постоянного тока и их наименования; удельные веса машин . . . . .	—
22. Способы соединения возбуждающей обмотки с обмоткой якоря . . . . .	39
23. Способы защиты машин постоянного тока от внешних воздействий . . . . .	41
24. Способы охлаждения машин постоянного тока . . . . .	43
25. Конструктивные исполнения машин постоянного тока . . . . .	44
26. Области применения машин постоянного тока и достигнутые мощности . . . . .	—

	Стр.
27. Стандарты на эл машины . . . . .	46
28. Номинальные величины и номинальные режимы работы эл. машин . . . . .	48
29. Напряжения машин постоянного тока . . . . .	—
30. Скорости вращения машин постоянного тока . . . . .	49
31. Понятие о современной машине постоянного тока . . . . .	—
32. О теории современных машин постоянного тока . . . . .	50
<b>Б. Конструктивное выполнение главнейших деталей машин постоянного тока . . . . .</b>	<b>52</b>
33. Общие замечания . . . . .	—
34. Примеры выполненных машин постоянного тока . . . . .	53
35. Якорь . . . . .	—
36. Пазы якоря . . . . .	61
37. Якорная обмотка и ее укладка в пазы якоря . . . . .	63
38. Изоляция якорной обмотки . . . . .	65
39. Коллектор . . . . .	70
40. Детали токособирательного аппарата . . . . .	73
41. Ярмо, фундаментные плиты, салазки . . . . .	77
42. Основные магнитные полюсы и их катушки . . . . .	80
43. Добавочные, или коммутационные, магнитные полюсы и их катушки . . . . .	83
44. Компенсационная обмотка . . . . .	85

## Глава II

### ГЛАВНАЯ МАГНИТНАЯ ЦЕПЬ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ ХОЛОСТОМ ХОДЕ

<b>А. Обоснования расчета главной магнитной цепи . . . . .</b>	<b>86</b>
45. Вводные замечания . . . . .	—
46. Закон преломления магнитных линий . . . . .	87
47. Связь между направлением тока и направлением создаваемых им магнитных линий . . . . .	—
48. Закон магнитной цепи . . . . .	88
49. Применение закона магнитной цепи к машине постоянного тока . . . . .	90
50. Магнитный поток полюсов и ярма . . . . .	92
51. Построение кривой распределения магнитного потока в зазоре . . . . .	93
<b>Б. Вычисление ампервитков для отдельных участков главной магнитной цепи . . . . .</b>	<b>97</b>
52. Вычисление ампервитков для сердечника якоря ( $AW_a$ ) . . . . .	—
53. Вычисление ампервитков для зубцового слоя якоря при прямоугольных пазах якоря ( $AW_z$ ) . . . . .	98
54. Вычисление ампервитков для зазора ( $AW_\delta$ ) . . . . .	103
55. Вычисление ампервитков для полюсных сердечников с полюсными башмаками и для ярма ( $AW_m, AW_j$ ) . . . . .	106
56. Расчетная кривая намагничивания и характеристика генераторного холостого хода . . . . .	108
<b>В. Добавочные участки главной магнитной цепи и уточнения некоторых расчетов . . . . .</b>	<b>109</b>
57. Общие замечания . . . . .	109
58. Вычисление ампервитков для зубцового слоя при овальных и трапецевидных пазах якоря ( $AW_z$ ) . . . . .	—
59. Вычисление ампервитков для стыка сердечника и ярма ( $AW_s$ ) . . . . .	111
60. Вычисление ампервитков для полюсного сердечника и полюсного башмака компенсированной машины ( $AW_m$ ) . . . . .	—
61. Вычисление ампервитков для полюсных сердечников, включая полюсные башмаки, при наличии в сердечниках быстро насыщающихся участков или магнитных прокладок между сердечниками и ярмом . . . . .	113
62. Вычисление коэффициента магнитного рассеяния главных полюсов ( $\sigma_0$ ) . . . . .	115

## Глава III

### ГЛАВНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ ХОЛОСТОМ ХОДЕ

<b>А. Типы якорей и их обмоток машин постоянного тока . . . . .</b>	<b>122</b>
63. Исходное подразделение якорных обмоток машин постоянного тока . . . . .	—
64. Подразделение замкнутых якорных обмоток машин постоянного тока по типам якорей . . . . .	—



	Стр.
65 Роль кольцевых и барабанных замкнутых якорных обмоток в ходе развития машин постоянного тока . . . . .	123
66 Подразделение замкнутых якорных обмоток по типам их выполнения . . . . .	—
<b>Б. Первообразные, или основные, замкнутые обмотки кольцевого якоря и индуктируемая в них э. д. с. . . . .</b>	<b>125</b>
67. Простейшее выполнение замкнутой обмотки кольцевого якоря . . . . .	—
68. Несколько вспомогательных понятий . . . . .	129
69. Э. д. с., индуктируемая в простой спиральной обмотке кольцевого якоря . . . . .	130
70. Разновидности простой параллельной обмотки кольцевого якоря, полярности щеток . . . . .	134
71. Условия симметрии простой параллельной обмотки кольцевого якоря многополюсной машины постоянного тока . . . . .	139
72. Выполнение простой последовательной обмотки кольцевого якоря . . . . .	141
73. Разновидности простой последовательной обмотки кольцевого якоря . . . . .	144
74. Отсутствие в простой последовательной обмотке кольцевого якоря точек равного потенциала . . . . .	149
75. Число необходимых и число возможных зонных комплектов щеток простой последовательной обмотки кольцевого якоря, полярности щеток . . . . .	—
<b>В. Производные, или множественные, замкнутые обмотки кольцевого якоря . . . . .</b>	<b>151</b>
76. Множественные параллельные обмотки кольцевого якоря и их разновидности . . . . .	—
77. Условия симметрии множественных параллельных обмоток кольцевого якоря . . . . .	155
78. Множественные последовательные обмотки кольцевого якоря и их разновидности . . . . .	156
79. Условия симметрии множественных последовательных обмоток кольцевого якоря . . . . .	158
80. Комбинированные множественные обмотки кольцевого якоря и их разновидности . . . . .	159
<b>Г. Способы преобразования замкнутых обмоток кольцевого якоря в обмотки барабанного и дискового якорей . . . . .</b>	<b>162</b>
81. О способе преобразования кольцевых якорных обмоток в барабанные якорные обмотки . . . . .	—
82. Преобразование параллельных обмоток кольцевого якоря в обмотки гладкого барабанного якоря . . . . .	163
83. Преобразование последовательных обмоток кольцевого якоря в обмотки гладкого барабанного якоря . . . . .	16
84. Преобразование обмоток кольцевого якоря в обмотки зубчатых барабанных якорей . . . . .	170
85. Преобразование обмоток барабанного якоря в обмотки дискового якоря . . . . .	171
86. Недостатки кольцевых обмоток якоря . . . . .	172
<b>Д. Окончательный вид формулы для э. д. с. обмотки якоря; пульсации э. д. с. . . . .</b>	<b>—</b>
87. Окончательный вид формулы для э. д. с., индуктируемой в якорных обмотках . . . . .	—
88. О пульсациях э. д. с. на коллекторе . . . . .	176

#### Глава IV

### ЗАМКНУТЫЕ ОБМОТКИ ЗУБЧАТЫХ БАРАБАННЫХ ЯКОРЕЙ И ИНДУКТИРУЕМАЯ В НИХ Э. Д. С. ХОЛОСТОГО ХОДА

<b>А. Общие положения для всех типов обмоток . . . . .</b>	<b>179</b>
89. Введение . . . . .	—
90. Обобщение формулы для коллекторного и секционного якорного шага обмотки . . . . .	—
91. Условия кратности замыкания якорной обмотки . . . . .	180
92. Вычисление частичных секционных шагов обмотки барабанного зубчатого якоря . . . . .	181
93. Общие условия симметрии зубчатых барабанных обмоток . . . . .	183
94. Об уравнивательных соединениях . . . . .	184
95. Схемы обмоток . . . . .	—
<b>Б. Применяемые на практике симметричные обмотки зубчатых барабанных якорей . . . . .</b>	<b>187</b>
96. Обыкновенные симметричные петлевые обмотки зубчатого барабанного якоря . . . . .	—

	Стр
97 Обыкновенные симметричные последовательные обмотки зубчатого барабанного якоря . . . . .	190
- 98. Параллельная обмотка зубчатого барабанного якоря с двумя коллекторами . . . . .	193
99. Симметричные последовательные обмотки зубчатого барабанного якоря с увеличенным либо с уменьшенным числом коллекторных пластин .	194
<b>В. Несимметричные обмотки зубчатого барабанного якоря . . . . .</b>	<b>196</b>
100 Несимметричные последовательные обмотки с мертвыми секциями	—
101 Несимметричная искусственно замкнутая последовательная обмотка	198
<b>Г. Уравнительные соединения в замкнутых обмотках зубчатых барабанных якорей</b>	<b>200</b>
102 Уравнительные соединения в простых параллельных обмотках . . .	—
103. Уравнительные соединения в множественных последовательных обмотках	203
104. Уравнительные соединения в множественных параллельных обмотках	208
105. Выполнение уравнительных соединений .	211
<b>Д. Выбор типа обмотки барабанного якоря . . . . .</b>	<b>—</b>
106. О необходимой ширине щеток в зависимости от типа обмотки	—
107. Сравнение обмоток с технической точки зрения .	212
108. Сравнение обмоток с экономической точки зрения	213
109 Резюме . . . . .	214

## Глава V

### ЯВЛЕНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С НАГРУЗКОЙ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

<b>А. Реакция якоря и коммутация при нагрузке генератора постоянного тока</b>	<b>215</b>
110. Влияние нагрузки якоря на основное поле генератора постоянного тока и связанные с этим явления . . . . .	—
111. Форма кривой $m$ д с. и магнитного поля, создаваемого якорем	219
112 Результирующее магнитное поле машины без добавочных полюсов	220
113 Влияние на форму кривой магнитного поля якоря укорочения шага обмотки якоря и якорных зубцов . . . . .	222
114. Добавочные полюсы как средство для улучшения коммутации	—
115 Магнитные поля генератора с добавочными полюсами . . . . .	223
116 Влияние добавочных магнитных полюсов на основное магнитное поле машины постоянного тока . . . . .	224
<b>Б. Учет реакции якоря в машине постоянного тока при нагрузке ее генератором . .</b>	<b>227</b>
117. Учет влияния продольно действующих ампервитков якоря . . .	—
118. Учет влияния поперечно действующих ампервитков якоря	228
119. Расчет главной магнитной цепи машины постоянного тока при нагрузке ее генератором . . . . .	233
<b>В. Двигательный режим работы машины постоянного тока . . . . .</b>	<b>234</b>
120. Реакция якоря при работе машины постоянного тока двигателем	—
121 О двигателях постоянного тока с добавочными магнитными полюсами	235
122 О вращающем электромагнитном моменте машины постоянного тока .	236
123. Работа машины постоянного тока без возбуждения . . . . .	237
124 Расчет главной магнитной цепи машины постоянного тока при нагрузке ее двигателем . . . . .	238
<b>Г. Цель применения в машине постоянного тока компенсационной обмотки</b>	<b>—</b>
125 Предварительное замечание . . . . .	—
126. Нерациональность применения компенсационной обмотки как средства для улучшения коммутации . . . . .	—
127 Компенсационная обмотка как средство борьбы с искажением формы результирующего магнитного поля машины при тяжелых условиях ее работы	239
<b>Д. Потенциальные кривые коллектора . . . . .</b>	<b>241</b>
128 Потенциальная кривая коллектора при холостом ходе и синусоидальном поле . . . . .	—
129 Потенциальная кривая коллектора при любом магнитном поле	243
130. Вычисление напряжения между смежными коллекторными пластинами	244
131. Предельные допустимые значения для напряжения между смежными коллекторными пластинами и явление кругового огня	246

## Глава VI

## КОММУТАЦИЯ В МАШИНАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

А. Вводные соображения . . . . .	248
132. Причины, вызывающие искрение на коллекторе .	—
133. Визуальная оценка опасности искрения на коллекторе .	—
134. Сложность проблемы коммутации и целесообразный порядок ее рассмотрения . . . . .	249
Б. Коммутация в простейшем теоретическом случае . . . . .	250
135. Введение . . . . .	—
136. Диаграмма коммутации . . . . .	—
137. Уравнение коммутации в общем виде . . . . .	253
138. Прямолинейная коммутация . . . . .	254
139. Коммутация сопротивлением . . . . .	255
140. Общий случай коммутации . . . . .	257
141. Реактивная э. д. с. в коммутируемой секции якорной обмотки . . . . .	258
142. Коммутирующая э. д. с., создаваемая магнитным потоком добавочных полюсов . . . . .	261
143. О коммутации в машинах постоянного тока, не имеющих добавочных полюсов . . . . .	—
В. Параметры коммутируемых секций и зависимость их от различных факторов . . . . .	262
144. Вычисление периода коммутации для разных типов якорных обмоток . . . . .	—
145. Влияние на коммутацию секции якорной обмотки зубчатости якоря . . . . .	266
146. Период коммутации секций одного реального паза и необходимая ширина коммутационной зоны . . . . .	267
147. Вычисление магнитной проводимости для пазовой части якорной секции диаметральной простой параллельной обмотки барабанного зубчатого якоря при ширине щетки, равной коллекторному делению . . . . .	270
148. Влияние щеточного перекрытия на магнитную проводимость потоков пазового рассеяния секции якорной обмотки . . . . .	273
149. О проводимости для потоков рассеяния лобовых соединений якорной обмотки . . . . .	277
150. Выводы . . . . .	—
Г. Опытная наладка коммутации . . . . .	278
151. Способы измерений . . . . .	—
152. Способ подпитки добавочных полюсов . . . . .	—
153. Регулирование добавочных полюсов . . . . .	280
154. Способ снятия кривой падения напряжения под щеткой . . . . .	—
Д. Расчет магнитной цепи добавочных полюсов . . . . .	281
155. Исходное уравнение . . . . .	—
156. Определение размеров полюсного башмака добавочного полюса . . . . .	282
157. Расчет сердечника добавочного полюса . . . . .	283
158. Коэффициент магнитного рассеяния добавочных полюсов . . . . .	—
159. Кривая намагничивания добавочных полюсов . . . . .	287
Е. Причины коммутационного искрения, явление кругового огня и свойства щеток . . . . .	288
160. О классической теории коммутации и причинах коммутационного искрения . . . . .	—
161. Явление кругового огня и средства для его предотвращения . . . . .	290
162. Щетки, применяемые в динамостроении . . . . .	295

## Глава VII

## СВОЙСТВА ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

163. Характеристическое уравнение генераторов постоянного тока . . . . .	299
164. Подразделение характеристик генераторов постоянного тока . . . . .	—
А. Характеристики независимо возбуждаемого генератора постоянного тока . . . . .	300
165. Характеристики независимо возбуждаемого генератора постоянного тока при $I_a = \text{const}$ . . . . .	—
166. Характеристики независимо возбуждаемого генератора постоянного тока при $i_n = \text{const}$ . . . . .	305



	Стр.
167. Характеристики независимо возбуждаемого генератора при $U = \text{const}$	308
<b>Б. Характеристики последовательного генератора постоянного тока</b>	310
168. Общее замечание	—
169. Характеристики последовательного генератора постоянного тока, получаемые при измененной схеме соединений возбуждающей и якорной обмоток	311
170. Внешняя, или рабочая, характеристика последовательного генератора постоянного тока	—
<b>В. Характеристики параллельного генератора постоянного тока</b>	312
171. Общие замечания	—
172. Характеристики параллельного генератора постоянного тока при $I_g = \text{const}$	313
173. Характеристики параллельного генератора постоянного тока при $R_n = \text{const}$	314
174. Характеристики параллельного генератора постоянного тока при $U = \text{const}$	317
175. Характеристика холостого хода параллельного генератора постоянного тока при изменяющейся скорости вращения и неизменном сопротивлении цепи возбуждения	—
<b>Г. Характеристики смешанного генератора постоянного тока</b>	319
176. Общие замечания	—
177. Характеристики согласно-смешанного генератора постоянного тока при $I_g = \text{const}$	320
178. Характеристики согласно-смешанного генератора постоянного тока при $R_n = \text{const}$	321
<b>Д. Параллельное самовозбуждение и независимое возбуждение генераторов постоянного тока</b>	322
179. Внешние условия, необходимые для самовозбуждения параллельного генератора постоянного тока	—
180. Внутренние условия, необходимые для самовозбуждения параллельного генератора постоянного тока	324
181. Явления саморазмагничения и перемагничения параллельного генератора постоянного тока	325
182. Магнитноустойчивый параллельный генератор постоянного тока	326
183. О возбудителях постоянного тока с независимым возбуждением	327
184. Рабочие характеристики возбудителей постоянного тока	328

## Глава VIII

## СВОЙСТВА ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

<b>А. Переход от генераторного режима работы к двигательному. Характеристики двигателей постоянного тока</b>	330
185. Общее замечание	—
186. О направлении вращения машины постоянного тока при переходе ее от генераторного к двигательному режиму работы	—
187. Характеристическое уравнение двигателя постоянного тока	333
188. Основные рабочие характеристики двигателя постоянного тока	334
189. Уравнение скоростной характеристики двигателя постоянного тока	—
190. Уравнения моментной характеристики и механической характеристики двигателя постоянного тока	335
191. Основные рабочие характеристики параллельного двигателя постоянного тока	336
192. Условие устойчивой работы параллельного двигателя постоянного тока	342
193. Основные рабочие характеристики и устойчивость работы последовательного двигателя постоянного тока	343
194. Сравнение скоростных характеристик параллельного и последовательного двигателей постоянного тока	346
195. Возможные схемы включения возбуждающих обмоток и основные рабочие характеристики двигателей смешанного возбуждения	—
196. Сравнение свойств двигателей постоянного тока разных возбуждений и области их практического применения	348
197. Схемы включения двигателей постоянного тока и пускорегулирующая аппаратура	349

	Стр.
<b>Б. Пуск в ход двигателей постоянного тока . . . . .</b>	<b>353</b>
198. Необходимость пускового реостата в схеме пуска в ход двигателей постоянного тока и случаи, когда допустим безреостатный пуск в ход двигателей . . . . .	—
199. Уравнение движения двигателя в процессе пуска в ход . . . . .	355
<b>В. Регулирование скорости вращения двигателей постоянного тока . . . . .</b>	<b>—</b>
200. Возможные способы регулирования скорости вращения двигателей постоянного тока . . . . .	—
201. Способы регулирования скорости вращения обычных параллельных двигателей постоянного тока, работающих от сети неизменного напряжения . . . . .	356
202. Способы регулирования скорости вращения обычных параллельных двигателей постоянного тока изменением подводимого напряжения . . . . .	357
203. Способы регулирования скорости вращения специальных регулируемых параллельных двигателей постоянного тока . . . . .	360
204. Регулирование скорости вращения последовательных двигателей постоянного тока, работающих от сети неизменного напряжения . . . . .	—
205. Способы регулирования скорости вращения двигателей смешанного возбуждения . . . . .	363

### Глава IX

#### СОВМЕСТНАЯ РАБОТА МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

<b>А. Параллельная работа генераторов постоянного тока . . . . .</b>	<b>364</b>
206. Общее замечание . . . . .	—
207. Параллельная работа параллельных генераторов постоянного тока . . . . .	—
208. Параллельная работа согласно-смешанных генераторов постоянного тока . . . . .	367
<b>Б. Последовательное включение последовательного генератора и последовательного двигателя постоянного тока . . . . .</b>	<b>369</b>
209. Свойство схемы . . . . .	—
210. О передаче эл. энергии по системе Тюри . . . . .	—
<b>В. Явления колебаний при совместной работе машин постоянного тока . . . . .</b>	<b>371</b>
211. Виды колебаний . . . . .	—
212. Вынужденные колебания генераторов . . . . .	—
213. Влияние крутильных колебаний вала (машины) . . . . .	373
214. Свободные колебания машин постоянного тока . . . . .	374

### Глава X

#### ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ И КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

<b>А. Исходные положения . . . . .</b>	<b>375</b>
215. Вводные замечания . . . . .	—
216. Понятие о к. п. д. машины и способы его вычисления . . . . .	—
217. Подразделение потерь мощности в машине постоянного тока . . . . .	377
218. Общие соображения об опытном определении потерь мощности и к. п. д. эл. машины . . . . .	379
<b>Б. Вычисление механических потерь мощности в машине постоянного тока . . . . .</b>	<b>381</b>
219. Вычисление потерь мощности на трение щеток о коллектор . . . . .	—
220. Вычисление потерь мощности на трение в подшипниках . . . . .	382
221. Потери мощности на вентиляцию машин постоянного тока . . . . .	386
222. Совместный практический учет потерь мощности на трение в подшипниках и на вентиляцию машин постоянного тока . . . . .	—
<b>В. Вычисление электрических потерь мощности в машине постоянного тока . . . . .</b>	<b>388</b>
223. Вычисление эл. сопротивления электромашиной обмотки . . . . .	—
224. Вычисление основных потерь мощности в сопротивлении обмотки якоря . . . . .	389
225. Вычисление потерь мощности в сопротивлениях обмоток, последовательно соединенных с обмоткой якоря . . . . .	—
226. Вычисление потерь мощности в сопротивлении параллельной возбуждающей обмотки . . . . .	—
227. Вычисление потерь мощности в переходном слое щеток на коллекторе . . . . .	391
228. Учет добавочных потерь мощности в обмотке якоря . . . . .	392

	Стр.
<b>Г. Вычисление магнитных потерь мощности в машине постоянного тока</b>	395
229. Понятие об удельных магнитных потерях мощности в теле из ферромагнитного материала	—
230. Основные удельные гистерезисные потери мощности	396
231. Основные удельные вихревые потери мощности	397
232. Суммарные основные удельные магнитные потери мощности	399
233. Гистерезисные потери мощности в якоре машины постоянного тока при вращательном перемагничивании	—
234. Увеличение магнитных потерь мощности в якоре машины постоянного тока вследствие механической обработки якоря при его изготовлении	400
235. Практический учет магнитных потерь мощности в сердечнике якоря и в зубцах якоря при холостом ходе эл. машины	401
236. Учет добавочных магнитных потерь мощности при нагрузке эл. машины	403
<b>Д. Учет указаний основного электромашинного стандарта при расчете к. п. д. машин постоянного тока и некоторые зависимости</b>	—
237. Стандартное подразделение потерь мощности в параллельных машинах постоянного тока	—
238. Вычисление к. п. д. машины постоянного тока при частичных нагрузках	—
239. Вычисление нагрузки, при которой к. п. д. машины постоянного тока достигает своего наибольшего значения	404
240. Зависимость к. п. д. машины постоянного тока от величины номинальной мощности	406
<b>Е. Опытное определение к. п. д. машин постоянного тока</b>	—
241. Вводное замечание	—
242. Прямые методы опытного определения к. п. д. эл. машины	407
243. Косвенные методы опытного определения к. п. д. машины постоянного тока	408

## Глава XI

### ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В МАШИНАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

<b>А. Исходные положения</b>	413
244. Определение некоторых понятий	—
245. Методы измерения температур при испытании эл. машин	—
246. Предельные допустимые превышения температур для отдельных частей эл. машин и их обоснование	415
<b>Б. Рассеяние тепла с внешних поверхностей неизменно нагреваемого твердого тела</b>	420
247. Виды теплорассеяния с внешних поверхностей неизменно нагреваемого твердого тела	—
248. Лучистое рассеяние тепла	—
249. Рассеяние тепла через теплопроводность и естественную конвекцию тепла	422
250. Суммарное естественное теплорассеяние	423
251. Суммарное усиленное теплорассеяние	—
<b>В. Теория нагревания и остывания идеального однородного твердого тела и ее применение к тепловым процессам в эл. машинах</b>	424
252. Постановка задачи	—
253. Процесс нагревания идеального однородного твердого тела	—
254. Процесс остывания идеального однородного твердого тела	429
255. О некоторых свойствах кривых нагревания и остывания идеального однородного твердого тела	430
256. Другие виды уравнения нагревания идеального однородного твердого тела	433
257. О применении предыдущих выводов к нагреванию эл. машин	434
<b>Г. Процессы нагревания машин постоянного тока</b>	436
258. Подразделение режимов работы машин постоянного тока	—
259. Нагревание эл. машины при продолжительном номинальном режиме работы	—
260. Нагревание эл. машины при кратковременном номинальном режиме работы	—
261. Нагревание эл. машины при повторно-кратковременном режиме работы	438
262. Вычисление превышения температур отдельных частей эл. машины	440

## Глава XII

## ВЕНТИЛЯЦИЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

А. Способы осуществления усиленной вентиляции машин постоянного тока . . .	443
263. Типы вентиляторов, встраиваемых в машину постоянного тока . . .	—
264. Способы вентиляции машин постоянного тока и два возможных принципа действия встроенного вентилятора . . . . .	—
265. Системы вентиляции машин постоянного тока . . . . .	444
Б. Основы вентиляционного расчета машин постоянного тока . . . . .	446
266. Исходные положения . . . . .	—
267. Задача вентиляционного расчета машины постоянного тока . . . . .	—
268. Вычисление расхода воздуха, необходимого для усиленной вентиляции эл. машины . . . . .	447
269. Вычисление скоростного напора на выходе из эл. машины . . . . .	—
270. Вычисление потерь давления воздуха в эл. машине . . . . .	448
271. Аэродинамическое сопротивление всего пути воздушного потока в эл. машине . . . . .	449
272. О проектировании центробежного вентилятора для машин постоянного тока . . . . .	452

## ПОСЛЕСЛОВИЕ

Об историческом развитии электрических машин постоянного тока и их практического применения . . . . .	454
1. Литературные источники . . . . .	—
2. Основные исторические этапы в развитии эл. машин постоянного тока . .	—
3. Живучесть старых технических идей . . . . .	459
4. Об особых типах эл. машин постоянного тока . . . . .	460
5. Время наибольшего торжества эл. машины постоянного тока и первые предвестники грядущей потери первенства . . . . .	461
6. Завоевание первенства трехфазным током . . . . .	463
7. Период торжества трехфазного тока и намечающийся частичный реванш со стороны постоянного тока . . . . .	—
8. Борьба постоянного тока за сохранение определенных позиций и новые симптомы . . . . .	464
Литература . . . . .	465



## ВВЕДЕНИЕ

### А. ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ И ИХ ТЕРМИНОЛОГИИ

#### 1. Общепринятое подразделение эл. машин<sup>1</sup>

Согласно установившейся традиции, эл. машины делят на «эл. машины постоянного тока» и на «эл. машины переменного тока». Последние подразделяют на «синхронные эл. машины» и на «асинхронные эл. машины». Асинхрон-



Фиг. 1. Общепринятое подразделение электрических машин.

ные эл. машины подразделяют на «бесколлекторные асинхронные эл. машины», обычно называемые «асинхронными эл. машинами», и «коллекторные асинхронные эл. машины», обычно называемые «коллекторными эл. машинами переменного тока» (фиг. 1)

#### 2. Связь между эл. машинами и эл. трансформаторами

В курсы эл. машин, читаемые во втузах, включают всегда и эл. трансформаторы. По существу, эл. трансформатор — не эл. машина, а эл. аппарат, так как он не имеет движущихся частей, наличие которых является характер-

<sup>1</sup> Здесь и всюду дальше «эл» представляет собой сокращение терминов «электрический, -ая, -ое» (см. дальше, § 4)

ным признаком всякой машины как разновидности механизма. По этой причине упомянутые курсы следовало бы, во избежание недоразумений, называть «курсами эл. машин и эл. трансформаторов».<sup>1</sup>

Включение эл. трансформаторов во втузовские курсы эл. машин объясняется двумя причинами. Одна из них — исторического происхождения: те же заводы, которые строили эл. машины переменного тока, строили и эл. трансформаторы, так как лишь наличие трансформаторов давало то преимущество эл. машинам переменного тока над эл. машинами постоянного тока, которое в конечном счете привело к их преобладанию в промышленности. И ныне нельзя мыслить себе крупной установки переменного эл. тока без эл. трансформаторов. Однако, по мере развития производства эл. машин переменного тока и эл. трансформаторов, сделалось необходимым сосредоточение производства эл. трансформаторов на специальных трансформаторостроительных заводах. Дело в том, что, в связи с возможностью передачи эл. энергии переменного тока при помощи эл. трансформаторов на большие расстояния, рост высшего напряжения эл. трансформаторов шел значительно быстрее, чем рост напряжения эл. машин переменного тока. На нынешней стадии развития эл. машин переменного тока наивысшим рациональным напряжением для них является 16 кВ, хотя имеются успешные попытки применения напряжений более высоких, до 36 кВ. В то же время высшее напряжение в реально осуществленных эл. трансформаторах достигло 350 кВ, и нет препятствий к его дальнейшему повышению.<sup>2</sup> Столь высокие напряжения эл. трансформаторов и работа их на воздушные линии электропередачи, подверженные воздействию грозных разрядов, породили много специфических трансформаторных проблем, чуждых эл. машинам. Это привело при производстве эл. трансформаторов к технологическим проблемам, столь отличающимся от технологических проблем электромашиностроения, что выделение эл. трансформаторов в самостоятельное производство стало неизбежным и осуществилось во всем мире в период времени между двумя мировыми войнами (1914 и 1941 гг.). Таким образом, первая причина, — производственная связь, — роднившая эл. трансформаторы с эл. машинами, исчезла.

Вторая причина — принципиального характера, состоящая в том, что в основе применяемых на практике эл. трансформаторов, так же как и эл. машин, лежит принцип электромагнитной индукции (закон Фарадея), — остается незыблемой связью между ними.<sup>3</sup> При этом, для понимания многих явлений в эл. машинах переменного тока, знание физических процессов, протекающих в эл. трансформаторах, совершенно необходимо и, кроме того, теория большого класса эл. машин переменного тока, а именно, так называемых «бесколлекторных асинхронных эл. машин», может быть сведена к теории эл. трансформаторов, благодаря чему облегчается их теоретическое рассмотрение.

В силу этого, в теории эл. машин переменного тока теория эл. трансформаторов занимает прочное место, из чего, однако, не следует, что эл. трансформаторы можно называть эл. машинами. Кроме того, нужно иметь в виду, что у эл. трансформаторов целевая установка и процесс преобразования энергии другие, чем у эл. машин. Цель эл. машины состоит в том, чтобы преобразовать механическую энергию в электрическую энергию (генератор) или, обратно, эл. энергию в механическую энергию (двигатель), между тем, в эл. трансформаторе мы имеем дело с преобразованием эл. энергии переменного тока одного вида в эл. энергию переменного тока другого вида.

<sup>1</sup> Слово «трансформатор» имеет и неэлектротехнический смысл, поэтому здесь пользуемся наименованием «эл. трансформатор» (см. дальше, § 4).

<sup>2</sup> Передачи на расстояние порядка 1000 км в настоящее время строятся в Советском Союзе на напряжение 400 кВ.

<sup>3</sup> Эл. машины и эл. трансформаторы можно построить и на принципе электрической индукции, но они пока имеют весьма ограниченное применение.

### 3. О некоторых исходных терминах

Мы воспользовались выше общепринятым делением эл. машин на эл. машины постоянного тока и эл. машины переменного тока. Хотя термины «постоянный эл. ток» и «переменный эл. ток» и термин «машина» следует при изложении курса эл. машин считать известными, но на них не лишним будет остановиться, так как еще в недавнее сравнительно время довольно оживленно в Советском Союзе дискутировался вопрос о непригодности первых двух из перечисленных терминов и об уточнении понятия «машина».

а) О термине «постоянный эл. ток». Строго говоря, под «постоянным эл. током» следовало бы понимать «эл. ток, постоянный по величине», соответственно математическому понятию «постоянная величина». Но в электротехнику этот термин был введен в значении «эл. тока, постоянного по направлению и практически постоянного по величине». Под «практически постоянным по величине эл. током» понимают ток, изменения которого во времени столь незначительны по величине, что при рассмотрении явлений в эл. цепи, по которой проходит такой эл. ток, этими изменениями вполне можно пренебречь, а следовательно, можно не учитывать ни индуктивности, ни емкости эл. цепи. Таким образом, под «электрической машиной постоянного тока» следует понимать эл. машину, которая, при установившемся режиме работы, является «эл. машиной практически постоянного по величине эл. тока». Мы подчеркиваем, что речь идет об «установившемся режиме работы», т. е. о случае, когда все физические величины, характеризующие работу машины, как то: угловая скорость вращения (число оборотов в минуту), напряжение на ее зажимах, ток и т. д., остаются неизменными. При резких изменениях «нагрузки эл. машины постоянного тока» (мощности, развиваемой эл. машиной), т. е. при переходе этой машины от одного стационарного состояния к другому, мы имеем дело с так называемыми «переходными процессами», при рассмотрении которых приходится неизбежно учитывать индуктивность и взаимоиндуктивность отдельных эл. цепей машины. До сравнительно недавнего времени переходным процессам в эл. машинах постоянного тока уделялось мало внимания. В последние два-три десятилетия, в связи с широким применением постоянного тока в эл. тяге и, особенно, в ответственных металлургических прокатных установках (в которых значительная часть работы машины падает на время переходных процессов), эти вопросы приобрели очень большое значение и породили соответствующую обширную литературу. Следует, однако, отметить, что и в теории стационарных режимов эл. машины постоянного тока, а именно, при рассмотрении вопроса коммутации тока, приходится иметь дело с индуктивностью эл. цепей, а следовательно, выходить за пределы законов цепей постоянного тока. Кроме того, приходится уделять соответствующее внимание оценке понятия «практически постоянный эл. ток», т. е. заняться теми отступлениями эл. тока от строгого постоянства по величине, с которыми в обычных промышленных установках можно совершенно не считаться, но которыми в специфических условиях работы эл. машин постоянного тока пренебрегать нельзя. Причина в том, что эти отступления, именуемые «пульсациями постоянного эл. тока», сказываются очень пагубно на установках эл. связи. Для борьбы с пульсациями приходится прибегать к особым устройствам, — к фильтрам, имеющим целью сглаживать (уменьшать) эти пульсации.

б) О термине «переменный эл. ток». Под этим термином следовало бы понимать эл. ток, изменяющийся во времени любым образом, соответственно введенному в математику понятию «переменная величина». Однако в электротехнику термин «переменный эл. ток» вошел в значении эл. тока, изменяющегося по направлению (в противовес эл. току постоянного направления), а следовательно, и по величине, так как физически нельзя представлять себе изменения эл. тока по направлению без соответствующих

изменений по величине. При применении к эл. машине термин «переменный эл. ток» получил на практике более узкое понимание, а именно: под «эл. машиной переменного тока» понимают эл. машину, в которой, при установившемся режиме работы, изменения эл. тока по величине происходят «практически синусоидально». При этом под «практически синусоидальным эл. током» понимают переменный эл. ток, изменения которого во времени отличаются от строго синусоидального характера настолько незначительно, что этими отступлениями вполне можно пренебречь при изучении основных явлений, происходящих в такой эл. машине.

При изучении ряда второстепенных явлений приходится входить в рассмотрение действительного характера эл. тока машины, чем и объясняются подчеркнутые нами слова «основных явлений». Кроме того, нужно отметить, что в эл. машинах переменного тока переходные процессы, в особенности при так называемом «внезапном коротком замыкании», уже давно привлекли соответствующее внимание, и рассмотрение их должно обязательно входить в курс этих машин.

Под переменным эл. током следовало бы понимать «однофазный эл. ток», однако в прикладных областях электротехники, — в том числе и в электромашиностроении, — под переменным эл. током, если нет оговорки, понимают переменный эл. ток любого числа фаз, т. е. как однофазный, так и многофазный. Из систем многофазных эл. токов на практике имеет подавляющее распространение система трехфазного эл. тока, поэтому на практике мы встречаем обычно лишь однофазные и трехфазные эл. машины.

Под многофазным переменным эл. током, если нет оговорки, понимают «практически симметричный многофазный переменный эл. ток», т. е. такой многофазный эл. ток, отступлениями которого от строгой симметрии вполне можно пренебречь. При этом следует отметить, что для оценки применимости терминов «практически синусоидальный эл. ток» и «практически симметричный многофазный эл. ток» практика вынудила ввести особые «критерии», которые рассматриваются в курсах машин переменного тока.

в) О терминах «механизм» и «машина». Термин «машина» определяется через термин «механизм». Под «механизмом» понимают совокупность тел, именуемых «звеньями», сочлененных между собой таким образом, чтобы, при заданных перемещениях одного или нескольких из них, — «ведущего звена» или «ведущих звеньев», — все остальные тела — «ведомые звенья» — имели вполне определенные перемещения. При этом одно тело — звено — механизма рассматривается как неподвижное и называется «стойкой», а перемещения прочих определяются относительно него.

Опираясь на термин «механизм», можно принять для наших целей следующее определение «машины»: «машина — механизм, предназначенный для энергопреобразовательных целей».

По целевому назначению следует различать два класса машин: 1) «машины энергетические», т. е. машины, предназначенные для преобразования энергии одного определенного рода в энергию другого определенного рода с целью ее дальнейшего использования (например, «паровая машина», «гидравлическая турбина» и т. п.) и 2) «машины-орудия», т. е. машины, предназначенные для преобразования энергии определенного рода непосредственно в определенную механическую работу (например, «паровой молот», «гидравлический пресс»).

г) О термине «электрическая машина». Соответственно широкому пониманию, вкладываемому в термин «машина», термин «эл. машина» также должен пониматься с научной точки зрения в широком смысле. Его определение можно дать в следующем виде: «эл. машина — машина, выполненная на принципе взаимнообратимости механической и электрической энергии». При этом следует, очевидно, различать, соответственно основному подразделению машин, «энергетические эл. машины» и «эл. машины-орудия». На практике,



однако, под эл. машиной укоренилось понимание «энергетической эл. машины» и обычно говорят, что «эл. машина есть машина, предназначенная для преобразования механической энергии в электрическую или электрической энергии в механическую». В первом случае имеем дело с «электромашиным генератором», во втором — с «электромашиным двигателем»

#### 4. Об электротехнических терминах и их сокращениях

Слова общего языка, а также общетехнические термины при использовании их для обозначения электротехнических понятий, в частности, из области электрических машин, только тогда приобретают значение электротехнических терминов, если к ним присоединяется терминологический элемент «электрический» или производный от него, например, «электромашиный», «электроизмерительный» и т. п. Так, слово «преобразователь» в соединении со словом «электрический» дает термин «электрический преобразователь». Таким же образом из общетехнических терминов «машина», «аппарат», «сеть» и т. п. получают электротехнические термины: «электрическая машина», «электрический аппарат», «электрическая сеть», причем возможно использование сокращенного терминологического элемента «электро» при слиянии его с другой частью термина: «электромашина», «электроаппарат», «электросеть» и т. д.

В тех случаях, когда ясно, что речь идет об электротехнических объектах и понятиях, терминологический элемент «электрический» (или производный от него), равно как и его сокращение «электро», можно опускать

### Б. ОБ ЭНЕРГОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ В ЭЛ. МАШИНАХ

#### 5. Об осуществлении в эл. машине энергопреобразовательного процесса

Из основных электроэнергетических теорем Пуанкаре и Баркгаузена [1, 2] вытекают следующие положения:

1) непосредственное взаимное преобразование механической и эл. энергии возможно только в том случае, если эл. энергия является энергией переменного эл. тока;

2) для осуществления процесса такого энергопреобразования необходимо, чтобы в системе эл. контуров, предназначенных для этой цели, была либо изменяющаяся электрическая индуктивность, либо изменяющаяся электрическая емкость,

3) для осуществления преобразования энергии переменного эл. тока в энергию постоянного эл. тока, необходимо, чтобы в предназначенной для этой цели системе эл. контуров имелось изменяющееся эл. сопротивление.

Из первого положения следует, что механическая энергия может преобразовываться в эл. машине только в энергию переменного эл. тока или обратно. Кажущееся противоречие этого утверждения с фактом существования эл. машин постоянного тока разрешается тем, что в «эл. машине постоянного тока» мы имеем двустадийное преобразование энергии. Так, в случае электромашиного генератора постоянного тока мы имеем эл. машину, в которой механическая энергия преобразуется в энергию переменного эл. тока, а эта последняя, вследствие наличия особого устройства, представляющего собой «изменяющееся эл. сопротивление», преобразуется в энергию постоянного эл. тока; в случае электромашиного двигателя процесс идет, очевидно, в обратном направлении: подводимая к электромашиному двигателю энергия постоянного эл. тока преобразуется посредством упомянутого изменяющегося эл. сопротивления в энергию переменного эл. тока, а последняя — в энергию механическую.

Забегая несколько вперед, можем указать, что роль упомянутого изменяющегося эл. сопротивления выполняет «скользящий эл. контакт», который

в обычной «коллекторной эл. машине постоянного тока» состоит из «электромашиной щетки» и «электромашинного коллектора», а в «униполярной эл. машине постоянного тока» из «электромашиной щетки» и «электромашинных контактных колец» (см. дальше, § 14).

Так как для создания в эл. машине процесса энергопреобразования необходимо наличие в ней или «изменяющейся эл. индуктивности», или «изменяющейся эл. емкости», то эл. машину можно выполнить либо на принципе электромагнитной индукции, либо на принципе электрической индукции. В первом случае получаем «индуктивную эл. машину», во втором — «емкостную эл. машину» [Л. 2]. Емкостные эл. машины не имеют пока практического значения. Применяемые в промышленности, на транспорте и в военном деле эл. машины представляют собой индуктивные эл. машины, за которыми на практике укоренилось краткое наименование «эл. машина», являющееся, по существу, более широким понятием.

## 6. Энергетическая обратимость эл. машины

По закону Э. Х. Ленца индуктированный ток в замкнутом эл. контуре всегда имеет такое направление, при котором возникающая электромагнитная сила стремится препятствовать тому изменению (движению), благодаря которому индуктируется эл. ток. На этом основании всякая индуктивная эл. машина «энергетически обратима»,<sup>1</sup> т. е. может, принципиально, работать как электромашиным генератором, так и электромашиным двигателем. Тем не менее, при проектировании эл. машины совершенно необходимо знать, для какого режима работы она предназначена, — для генераторного или двигательного. Это объясняется тем, что на практике к электромашинному генератору и к электромашинному двигателю предъявляются определенные требования, которые не всегда совместимы, а потому может оказаться, что эл. машина, выполненная как электромашиный генератор, не будет в состоянии удовлетворительно работать в качестве электромашинного двигателя, и наоборот. Поэтому всякая эл. машина должна иметь на своем «заводском щитке»<sup>2</sup> указание, для какого режима работы она предназначена выпустившим ее заводом. Кроме того, нужно отметить, что ряд типов эл. машин возник и применяется только в качестве электромашинного генератора, либо только в качестве электромашинного двигателя.

## 7. О характере движения, используемого в эл. машине

Эл. машины могут быть выполнены как с возвратно-поступательным движением, — «возвратно-поступательные эл. машины», так и с вращательным движением, — «вращательные эл. машины». Первые, как менее совершенные, утратили свое практическое значение, поэтому, говоря об эл. машине, имеют в виду, как правило, «вращательные эл. машины».

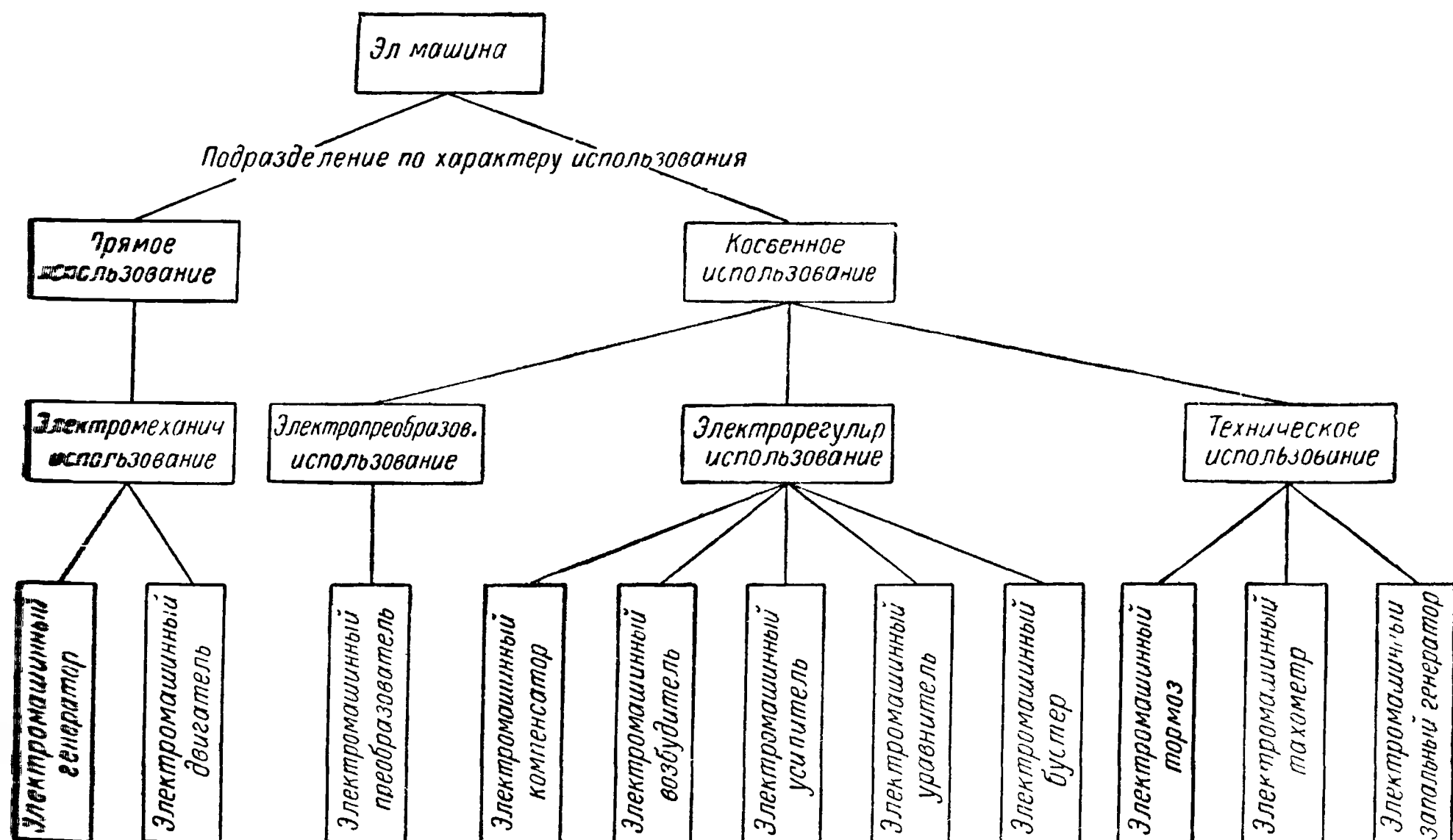
## 8. О прямом и косвенном использовании эл. машины

Применение эл. машины в качестве генератора эл. энергии или в качестве двигателя, преобразующего эл. энергию в механическую, представляет собой «прямое использование эл. машины», соответствующее непосредственному назначению эл. машины, которое вытекает из ее определения (§ 3, г). Но эл. машина находит себе также многочисленные косвенные применения (фиг. 2)

<sup>1</sup> Мы пользуемся здесь термином «энергетическая обратимость», а не просто «обратимость», так как эл. машина обладает еще другими обратимостями (см. дальше, § 10 и 11)

<sup>2</sup> Металлическая пластинка, прикрепленная на машине в доступном для обозрения месте, с данными эл. машины

как электрического характера, так и неэлектрического. К числу косвенных электротехнических использований эл. машины относится применение ее для преобразования эл. энергии одного определенного вида в эл. энергию другого определенного вида, например: 1) для преобразования энергии переменного эл. тока определенной частоты, определенного числа фаз и определенного напряжения в энергию переменного эл. тока с изменением любого или любых двух, или всех трех характерных признаков, 2) для преобразования энергии переменного эл. тока в энергию постоянного эл. тока, или обратно, 3) для преобразования энергии постоянного эл. тока определенного напряжения в энергию постоянного эл. тока другого определенного напряжения



Фиг 2 Подразделение эл машин по их практическому использованию.

Если указанные преобразования происходят в одной эл машине, то мы имеем дело с «электромашинным преобразователем», если же преобразование осуществляется посредством двух или нескольких эл. машин, жестко соединенных между собой механически и электрически или только механически, то такой электромашинный агрегат (т. е. совокупность эл. машин) называется преобразовательным электромашинным агрегатом.

Применение эл. машины в качестве электромашинного преобразователя является косвенным использованием эл. машины потому, что характерное для эл. машины преобразование механической энергии в электрическую или обратно происходит в электромашинном преобразователе лишь в той мере, в какой это необходимо для покрытия потерь электромашинного преобразователя. По этой причине последний при выполнении своих функций представляет собой идущий вхолостую электромашинный генератор или электромашинный двигатель.

Другим примером косвенного электротехнического использования эл. машины является применение ее в качестве «электромашинного компенсатора»; он представляет собой эл. машину, приспособленную для изменения реактивной мощности той эл. цепи (эл. сети, эл. системы), к которой он приключается. Во время выполнения своих функций электромашинный компенсатор представляет собой идущий вхолостую электромашинный генератор либо электромашинный двигатель.

Возможны и другие косвенные электротехнические использования эл. машин, в которых они работают в специальных генераторных или двигательных режимах, например, в качестве «электромашинного бустера» (регулирование напряжения эл. сети), «электромашинного уравнивателя» (выравнивание нагрузок отдельных плеч многопроводной эл. сети), «электромашинного усилителя» (многократное и быстрое увеличение мощности, отдаваемой эл. машиной в эл. сеть, при незначительном изменении возбуждающего тока) и т. д.

К неэлектротехническому использованию эл. машин относится, например, применение ее в качестве «электромашинного тахометра», «запального эл. генератора», получившего название «магнето» (для зажигания горючей смеси в двигателях внутреннего сгорания), «электромашинного тормоза» и т. д. При первоначальном изучении эл. машин естественно начинать с основных, прямых электротехнических применений эл. машин, чему мы и будем следовать.

## В. ПОДРАЗДЕЛЕНИЕ ЭЛ. МАШИН ПО ВНЕШНИМ ПРИЗНАКАМ

### 9. Подразделение эл. машин по признакам, вытекающим из определения эл. машины

Выше мы указали признаки эл. машин, вытекающие из определения эл. машины, не касаясь ни ее конструктивного выполнения, ни существа происходящего в ней физического процесса. Эти подразделения сведены в схему на фиг. 3. Устраняя из дальнейшего рассмотрения косвенные использования эл. машин и те из вышеперечисленных разновидностей эл. машин, которые не имеют на современной стадии электромашиностроения широкого практического значения («емкостные эл. машины»; «эл. машины-орудия»; «возвратно-поступательные эл. машины»), приходим к более узкому понятию об эл. машине как «вращательной энергетической индуктивной эл. машине прямого использования», т. е. либо в качестве «электромашинного генератора», либо в качестве «электромашинного двигателя». Изучение этих эл. машин и составляет основное содержание курса эл. машин.

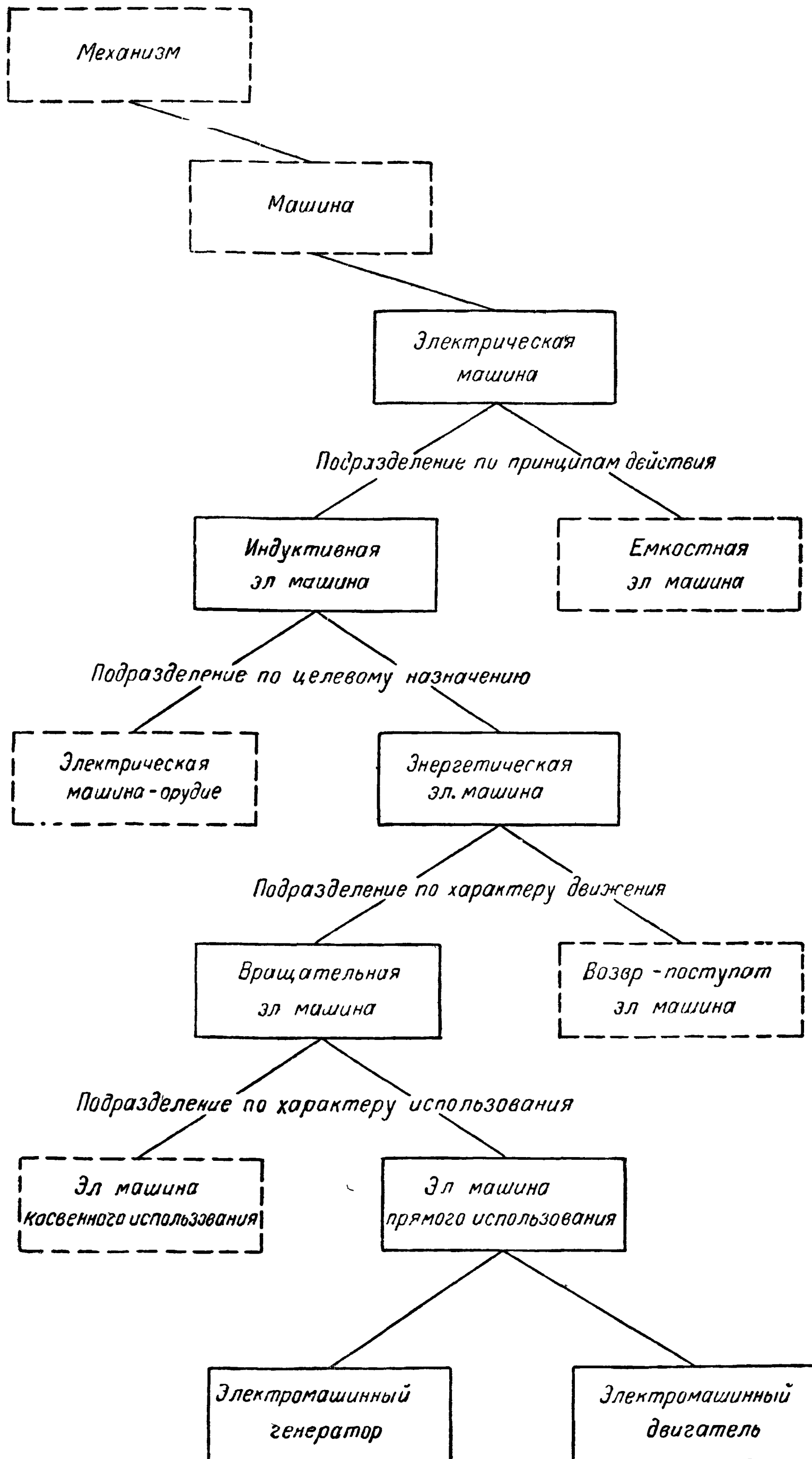
Заметим, кстати, что замена термина «электромашинный генератор» термином «электрический генератор» возможно только тогда, когда ясно, о чем идет речь, так как термин «электрический генератор» имеет более широкое, а не только электромеханическое значение, например, «ламповый электрический генератор». Замена термина «электромашинный двигатель» на более краткий «электрический двигатель» вполне законна, так как в самом понятии «двигатель» содержится указание на то, что речь идет о механизме.

### 10. Подразделение эл. машин по кинематическим признакам и по конфигурациям ротора

В том суженном, общепринятом понимании, к которому мы пришли в предыдущем параграфе, эл. машина представляет собой разновидность простейших механизмов, которая называется «вращательной парой». Она состоит из двух звеньев, сочлененных между собой таким образом, что при неподвижном одном звене другое может совершать вращательное движение. Эти два звена мы условимся называть «основными органами эл. машин».

а) Подразделение по числу механических звеньев. С точки зрения осуществления в эл. машине энергопреобразовательного процесса на основе электромагнитной индукции, важно лишь взаимоотношительное движение основных органов эл. машины, а потому не только мыслимы, но и выполнялись на практике конструкции, в которых оба основных органа эл. машины приводятся во вращение вокруг общей оси в разные стороны с одинаковыми или с разными скоростями, либо в одну и ту же сторону, но тогда непременно с разными скоростями. Таковую эл. машину можно назвать «трехзвенной эл. машиной»;

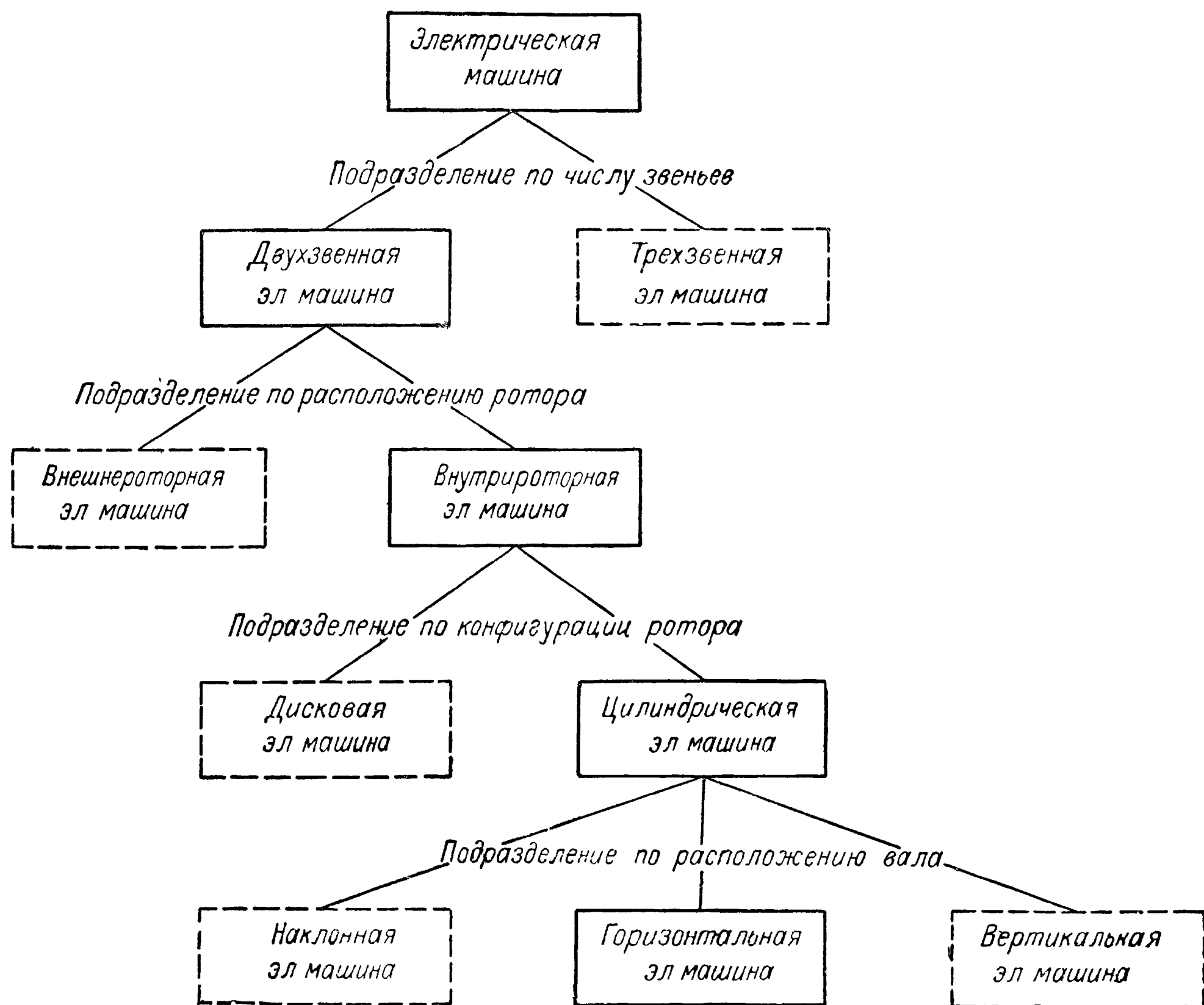




Фиг. 3. Подразделение эл. машин по признакам, вытекающим из определения эл. машины.

в ней третьим звеном является «стойка» — неподвижная часть, при посредстве которой общая для обеих вращающихся частей ось сохраняет свое неизменное положение в пространстве. В противовес этому обычную эл. машину можно назвать «двухзвенной машиной». Мы будем заниматься в дальнейшем только двухзвенными эл. машинами.

В каждом из основных органов двухзвенной эл. машины следует принципиально различать части, наличие которых необходимо для создания в эл.



Фиг 4 Подразделение эл машин по кинематическим признакам и по конфигурациям ротора

машине энергопреобразовательного процесса, — их условимся называть «активными частями», — и «части крепительные» или конструктивные, имеющие конструктивное назначение. Конструктивные части неподвижного основного органа эл. машины называют станиной эл. машины, а совокупность из станины и удерживаемой ею активной части — «статором эл. машины». Конструктивную часть вращающегося основного органа эл. машины, удерживающую его активную часть, называют остовом, а совокупность из остова, вала и активной вращающейся части называют «ротором эл. машины». Таким образом, термины «электромашинный статор» и «электромашинный ротор» обозначают, соответственно, неподвижную и вращающуюся часть эл. машины, что отвечает значению этих латинских слов.<sup>1</sup> Однако иногда этими терминами обозначают только активные части указанных двух основных органов.

<sup>1</sup> Терминоэлемент «электромашинный» в дальнейшем будем опускать и будем говорить кратко «статор» и «ротор».

б) Подразделение по взаимоотноственному расположению основных органов эл. машины; механическая конструктивная обратимость. Как правило, эл. машины строят с внутренним ротором, который объемлется наружным статором. В некоторых случаях, однако, используют и другую конструкцию, а именно, с наружным ротором и внутренним статором. Для характеристики взаиморасположения статора и ротора достаточно, очевидно, указать лишь расположение одного из них, например, ротора, поэтому, соответственно двум имеющимся возможностям, будем различать: «внутрироторную эл. машину» и «внешнероторную эл. машину». Возможность выполнить машину либо с внутренним ротором либо с внешним ротором представляет собой вторую обратимость эл. машины, назовем ее «механической конструктивной обратимостью».

в) Подразделение по конфигурациям ротора. По конфигурациям ротора различают «дисковые эл. машины» и «цилиндрические эл. машины». Дисковые эл. машины ныне не применяются.

г) Подразделение по пространственному расположению вала эл. машины. Вал эл. машины может иметь любое расположение в пространстве; соответственно этому различают «горизонтальные эл. машины», «вертикальные эл. машины» и «наклонные эл. машины».

д) Резюме. Ввиду того что особенности рассмотренных разновидностей эл. машин сказываются только на конструктивных деталях эл. машины, не затрагивая существа происходящего в эл. машине физического процесса, мы выберем для дальнейшего рассмотрения наиболее простую, общераспространенную конструкцию, а именно: «цилиндрическую горизонтальную внутрироторную двухзвенную вращательную энергетическую индуктивную эл. машину» и будем называть ее просто «электрической машиной».

Сводка произведенных в этом параграфе подразделений эл. машин дана на схеме фиг. 4.

## 11. Кинематическая обратимость эл. машины

Из сделанного выше указания, что с точки зрения осуществления в эл. машине энергопреобразования важно лишь взаимоотноственное движение ее двух основных органов, вытекает «кинематическая обратимость эл. машины». Это значит, что если ротор эл. машины застопорить, а статору дать возможность вращаться, то он придет во вращение, при этом будет вращаться, при неизменных электрических соединениях, в сторону, обратную той, в которую вращался ротор, превращенный в статор (это следует из законов механики). Очевидно, что для придания статору возможности вращения его придется снабдить соответствующими подшипниками и, кроме того, скользящими электрическими контактами, чтобы сохранить подачу эл. энергии к статору, если таковая имела место до переделки. Очевидно, что при кинематическом обращении внутрироторной эл. машины получим внешнероторную эл. машину, и наоборот.

## 12. Подразделение эл. машин по системам эл. тока и по числу проводящих связей

На практике мы имеем дело, в основном, с тремя системами эл. тока: системой двухпроводного постоянного эл. тока, системой двухпроводного однофазного эл. тока и системой трехпроводного трехфазного эл. тока; последняя представляет собой частный случай системы многофазного эл. тока. Очевидно, что для осуществления в эл. машине взаимобратного процесса преобразования электрической и механической энергии необходимо иметь на основных частях эл. машины соответствующим образом устроенные эл. цепи, которые мы будем называть «электромашинными обмотками». Не входя пока в способы выполнения этих обмоток, мы можем сказать, что, для осуществления электри-

ческой связи электромашинных обмоток с внешними системами эл. тока, они должны иметь число ответвлений соответственно присоединяемой системе эл. тока: два ответвления — в случае постоянного и в случае однофазного эл. тока — и три ответвления — в случае трехфазного эл. тока

Статорную и роторную электромашинные обмотки,<sup>1</sup> о которых идет речь, будем называть «основными обмотками», так как наличие их принципиально необходимо для осуществления эл. машины. Кроме них эл. машины могут иметь другие «вспомогательные обмотки» (как на статоре, так и на роторе), преследующие иные цели, а именно: либо борьбу с присущими данному типу эл. машины прирожденными, органическими недостатками, либо видоизменение свойств данного типа эл. машины

## Г. ПОДРАЗДЕЛЕНИЕ ЭЛ. МАШИН ПО ВНУТРЕННИМ ПРИЗНАКАМ

### 13. Подразделение эл. машин по числу якостей

Наличие в эл. машинах двух основных обмоток еще ничего не говорит о роли этих обмоток в энергопреобразовательном процессе эл. машины. Одна из этих обмоток безусловно должна быть «основной рабочей обмоткой», т. е. к ней должна подводиться или отводиться от нее эл. энергия, участвующая в энергопреобразовательном процессе. Другая основная обмотка может быть либо тоже рабочей, либо «основной нерабочей обмоткой».

В нерабочей основной обмотке, называемой обычно «намагничивающей или возбуждающей обмоткой», никакого полезного преобразования эл. энергии не происходит. Вся эл. энергия, подводимая к такой обмотке, идет на покрытие неизбежных потерь в меди, — если к нерабочей обмотке подводится постоянный эл. ток, или на покрытие потерь в меди и потерь в железе эл. машины при ее перемагничивании, — если нерабочая обмотка питается переменным эл. током. Назначение «основной нерабочей обмотки» вспомогательное: создание так называемого «основного магнитного потока эл. машины».

Орган эл. машины, снабженный основной рабочей обмоткой, называется «электромашинным якорем»; орган, снабженный основной нерабочей обмоткой, называется «электромашинным индуктором». В дальнейшем будем говорить кратко: «якорь» и «индуктор».

### 14. Подразделение эл. машин по выполнению роторного скользящего эл. контакта

В случае статорной (т. е. неподвижной) основной обмотки устройство от нее ответвлений для присоединения внешней неподвижной эл. системы осуществляется легко, в случае же роторной (т. е. вращающейся) основной обмотки возникает необходимость в устройстве «скользящего эл. контакта», так как иначе роторная обмотка недоступна

Скользящий эл. контакт может быть осуществлен двумя способами: либо в виде «кольцевого скользящего эл. контакта», либо в виде «коллекторного скользящего эл. контакта»

«Кольцевой скользящий эл. контакт» состоит из «электромашинных контактных колец» (медных или стальных) по числу необходимых ответвлений от обмотки (соединенных с этими ответвлениями и вращающихся вместе с обмоткой) и из неподвижных «электромашинных щеток» (как правило, угольных), опирающихся на кольца и соединенных с внешними неподвижными эл. системами. Контактные кольца должны быть изолированы друг от друга и от вала машины, на котором они укрепляются неподвижно. Сечения контактных

<sup>1</sup> Терминоэлемент «электромашинная» в дальнейшем будем опускать, но он всегда подразумевается.

делаются такими, что их эл. сопротивлениями по сравнению с эл. сопротивлением обмотки можно пренебречь.

«Электромашинный коллектор», являющийся вращающейся частью «скользящего эл. контакта», состоит из токопроводящих (обычно медных) сегментообразных пластин, собранных на валу в цилиндр и изолированных друг от друга и от вала, на котором они укрепляются неподвижно. Каждая «коллекторная пластина» соединяется электрически с равномерно распределенными по обмотке точками. Неподвижная часть «коллекторного скользящего эл. контакта» состоит из таких же неподвижных «электромашинных щеток»; щетки соединяются электрически с неподвижной эл. системой, как и у кольцевого «скользящего эл. контакта»; число их берется по числу нужных (в зависимости от системы эл. тока) ответвлений от обмотки.

Соответственно тому, снабжена ли эл. машина кольцевым или коллекторным скользящим эл. контактом, получаем подразделение на «эл. машины контактными кольцами» и на «коллекторные эл. машины».

## 15. Об электрической конструктивной обратимости эл. машины

Любая эл. машина обладает «электрической конструктивной обратимостью», состоящей в том, что в ней, без какого-либо нарушения электроэнергетического процесса, происходящего в ней, можно статорную и роторную обмотки поменять местами.

Если роторная обмотка, переносимая на статор, была выполнена с «кольцевым скользящим эл. контактом», то ей теперь «кольцевой скользящий эл. контакт» не нужен, так как точки, которые были присоединены к контактными кольцам и через которые происходило питание обмотки эл. током, теперь доступны для непосредственного соединения с внешней эл. системой. Воборот, для статорной обмотки, переносимой на ротор, теперь необходим «кольцевой скользящий эл. контакт» для осуществления ее электрической связи с внешней эл. системой.

Если роторная обмотка, переносимая на статор, была снабжена «коллекторным скользящим эл. контактом», то теперь ее нужно снабдить «обращенным коллекторным скользящим эл. контактом», в котором роли коллектора и щеток меняются, а именно: коллектор, соединенный электрически с обмоткой, становится неподвижной частью «скользящего эл. контакта», а щетки, бывшие ранее неподвижной частью скользящего эл. контакта, теперь должны быть приведены во вращение вместе с ротором. Так как такие щетки становятся недоступными для соединения их с внешней неподвижной эл. системой, то их нужно присоединить к контактными кольцам, вращающимся с ротором, и на них опереть дополнительные неподвижные в пространстве щетки.

Таким образом, эл. машина обладает четырьмя обратимостями: 1) энергетической, 2) механической конструктивной, 3) кинематической и 4) электрической конструктивной обратимостью.

## 16. Подразделение эл. машин по родам преобразуемой ими эл. энергии

Выше, подразделяя эл. машины по внешним электрическим признакам, мы учитывали системы эл. тока, с которыми связывается эл. машина, не входя в назначение этой связи.

На практике принято называть эл. машину по роду рабочего эл. тока, для преобразования энергии которого в механическую энергию, или для обратного преобразования, она предназначена. Иными словами, эл. машины делят на практике по роду преобразуемой ими эл. энергии. Таким образом, получаем следующее подразделение эл. машин по родам рабочего эл. тока (фиг. 5).



Эл. машина постоянного тока — эл. машина, в которой, при установившемся режиме ее работы, эл. энергия, участвующая в ее энергопреобразовательном процессе, является энергией практически постоянного тока.

Эл. машина однофазного тока, или однофазная эл. машина, — эл. машина, в которой, при установившемся режиме ее работы, эл. энергия, участвующая в ее энергопреобразовательном процессе, является энергией практически синусоидального однофазного эл. тока.



Фиг 5. Подразделение эл. машин по родам преобразуемого эл. тока.

Эл. машина многофазного тока, или многофазная эл. машина, — эл. машина, в которой, при установившемся режиме ее работы, эл. энергия, участвующая в ее энергопреобразовательном процессе, является энергией практически симметричного многофазного эл. тока.

Эл. машина трехфазного тока, или трехфазная эл. машина, — эл. машина многофазного тока, в которой число фаз равняется трем

Универсальная эл. машина — эл. машина, предназначенная для одновременной или разновременной работы в качестве эл. машины постоянного тока и в качестве эл. машины переменного тока.

#### Д. ВОЗМОЖНЫЕ ТИПЫ ЭЛ. МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА И ИХ ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ

##### 17. Особенности эл. машин постоянного тока

Для осуществления эл. машины необходимо, чтобы «основной орган», служащий якорем, обладал изменяющейся индуктивностью и изменяющимся эл. сопротивлением. Этими свойствами обладает, как можно показать, только «коллекторный ротор», а потому эл. машина постоянного тока должна быть обязательно «коллекторной». Другой основной орган эл. машины постоянного тока — статор, не обладающий указанными свойствами, может быть только «индуктором».

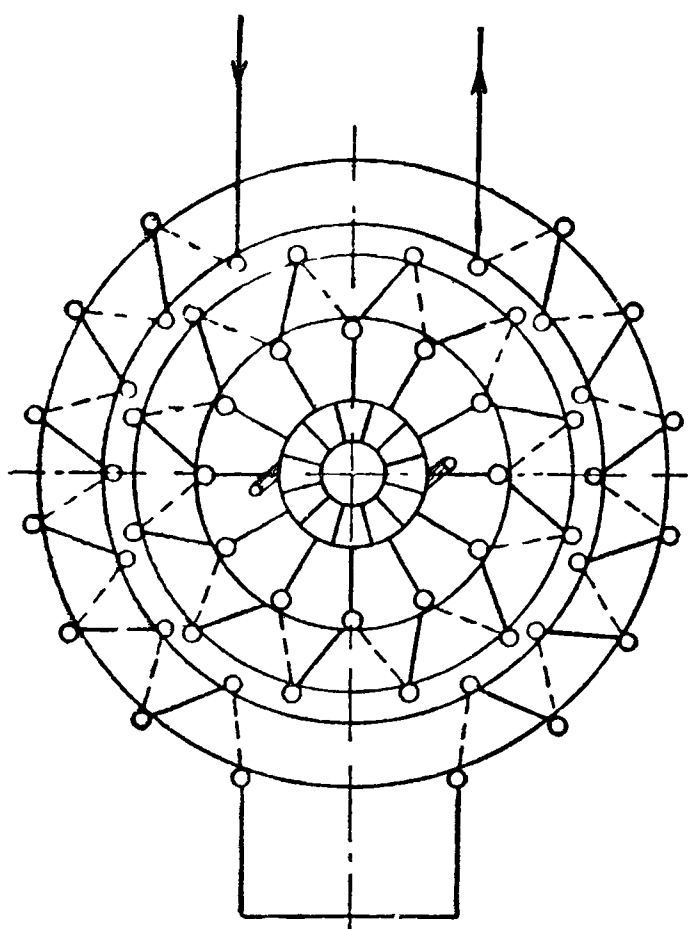
Так называемый «униполярный тип эл. машины постоянного тока» представляет собой, по существу, предельный случай «коллекторной эл. машины постоянного тока», а именно, с бесконечно большим числом коллекторных пластин.

Являясь «одноякорной эл. машиной», коллекторная эл. машина постоянного тока может быть с параллельным, с последовательным, а также с последовательно-параллельным, или смешанным, возбуждением. В эл. машине со смешанным возбуждением на индукторе имеется: 1) либо «основная индукторная обмотка», соединяемая параллельно с якорной обмоткой, и «вспомогательная возбуждающая обмотка», соединяемая последовательно с якорной обмоткой, 2) либо «основная индукторная обмотка», соединяемая с якорной обмоткой последовательно, и «вспомогательная возбуждающая обмотка», соединенная параллельно с якорной обмоткой.

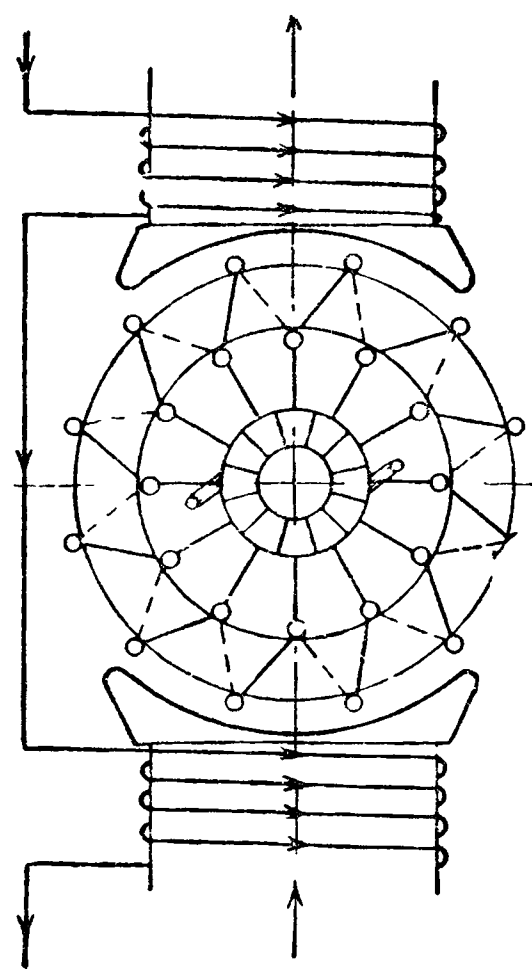
Возможно также устройство «эл. машины постоянного тока с независимым возбуждением»; она получается из параллельной эл. машины постоянного тока, если в ней индукторную, возбуждающую обмотку отсоединить от якоря и присоединить к независимому источнику постоянного тока неизменного напряжения.

## 18. Простейшая конструктивная схема эл. машины постоянного тока и ее модификации

а) Схема принципиального конструктивного выполнения эл. машины постоянного тока может быть представлена в виде двух коаксиальных цилиндров, набранных из тонкой листовой электротехнической стали и обмотанных равномерно распределенными спиральными обмотками, причем роторная обмотка присоединена к коллектору, на который в простейшем случае опираются две щетки (фиг. 6)



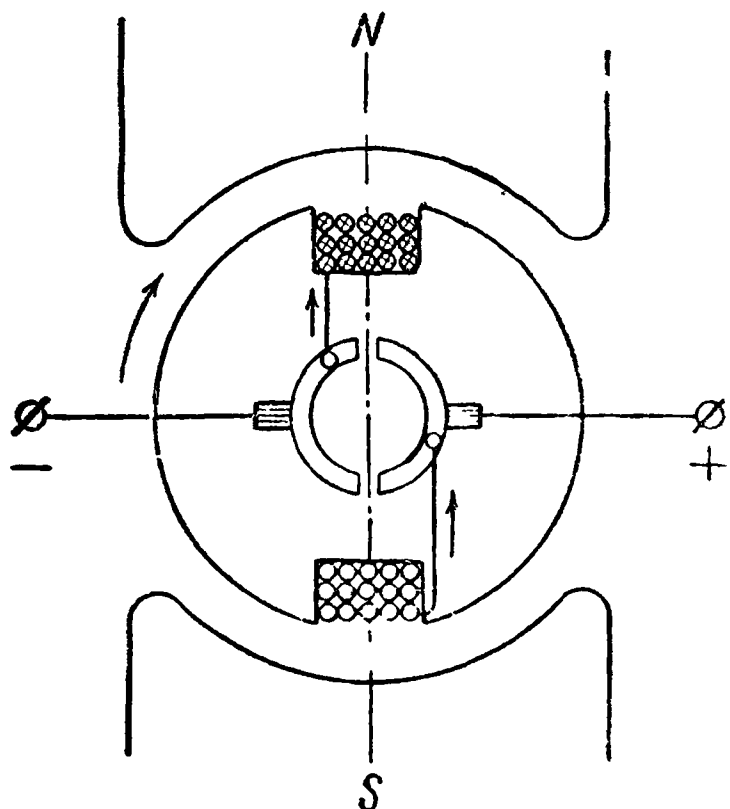
Фиг. 6 Простейшая конструктивная схема эл. машины постоянного тока.



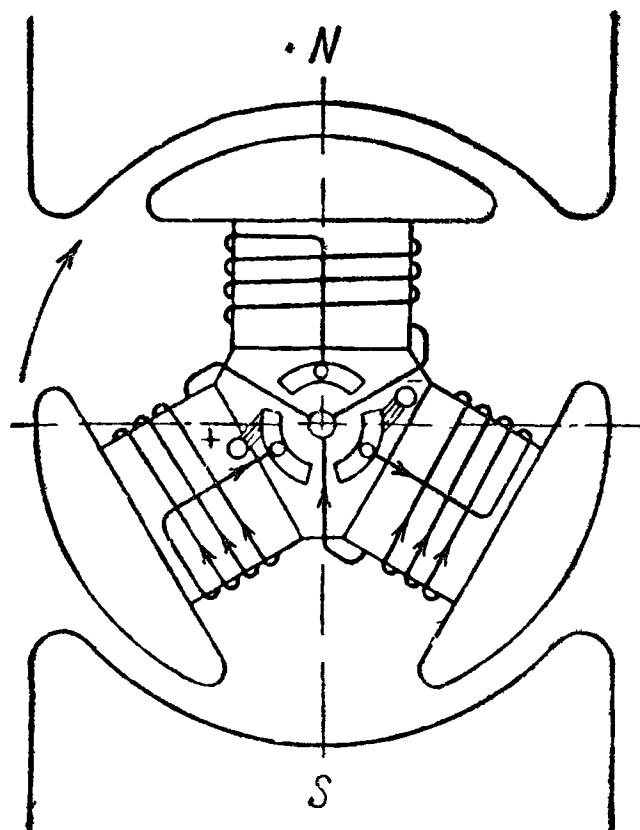
Фиг. 7. Явнополюсная эл. машина постоянного тока с кольцевой якорной обмоткой.

б) При установившемся режиме работы эл. машины постоянного тока магнитный поток, создаваемый индукторной, возбуждающей обмоткой, независимо от того, как она соединена с роторной, рабочей обмоткой, имеет почти неизменное направление и почти неизменную величину. Это позволяет заменить распределенную обмотку возбуждения концентрическими катушками, насаженными на сердечники (фиг. 7) с несколько уширенной частью, обращенной

в сторону якоря; в этом случае говорят о «явно выраженных магнитных полюсах», в отличие от «неявно выраженных магнитных полюсов» на фиг. 6. Уширенная часть полюсного сердечника называется «полюсным наконечником»

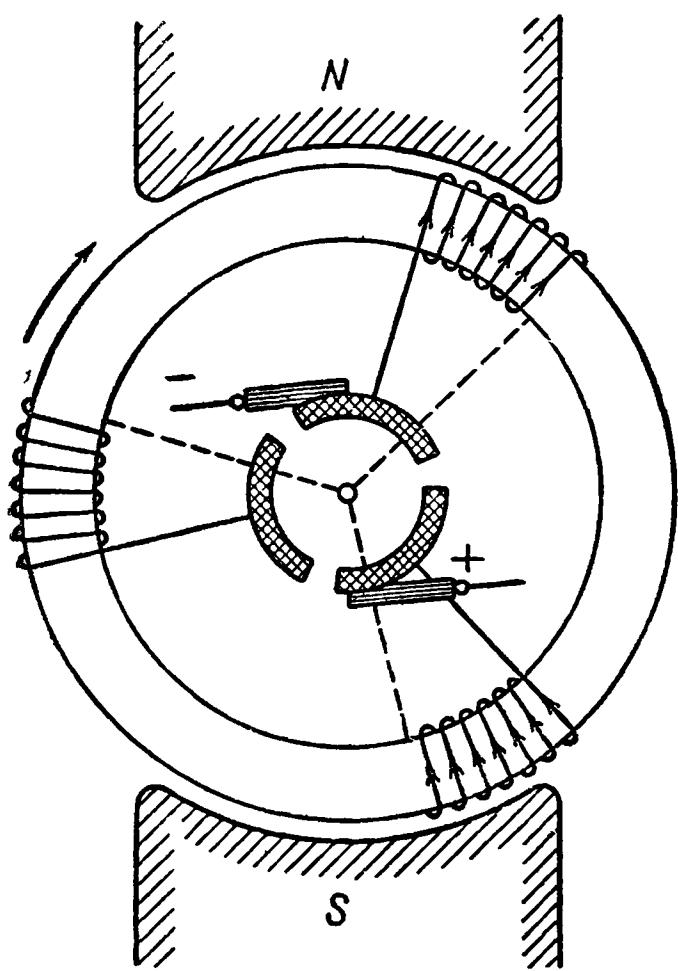


Фиг. 8. Эл. машина постоянного тока с двойным Т-образным якорем и разомкнутой якорной обмоткой

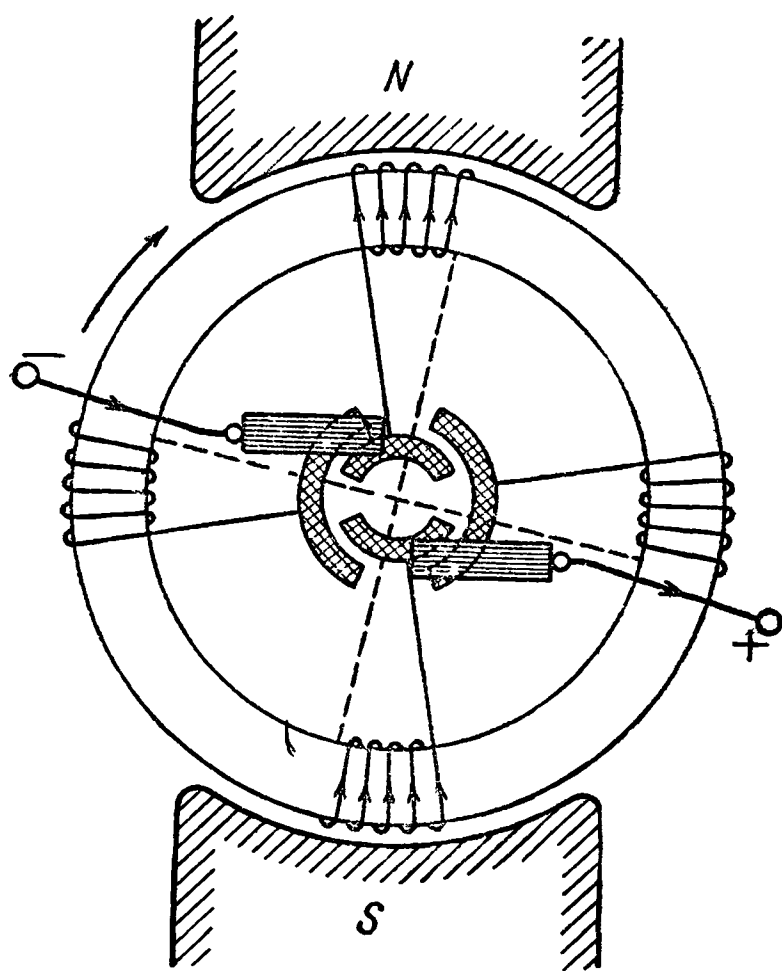


Фиг. 9 Эл. машина постоянного тока системы Шуккерта с разомкнутой якорной обмоткой.

или «полюсным башмаком». Таким образом, следует различать «неявнополюсные эл. машины постоянного тока» (фиг 6) и «явнополюсные эл. машины постоянного тока» (фиг 7)



Фиг. 10. Эл. машина постоянного тока системы Томпсона-Густона с разомкнутой якорной обмоткой



Фиг. 11. Эл. машина постоянного тока системы Бреша с разомкнутой якорной обмоткой.

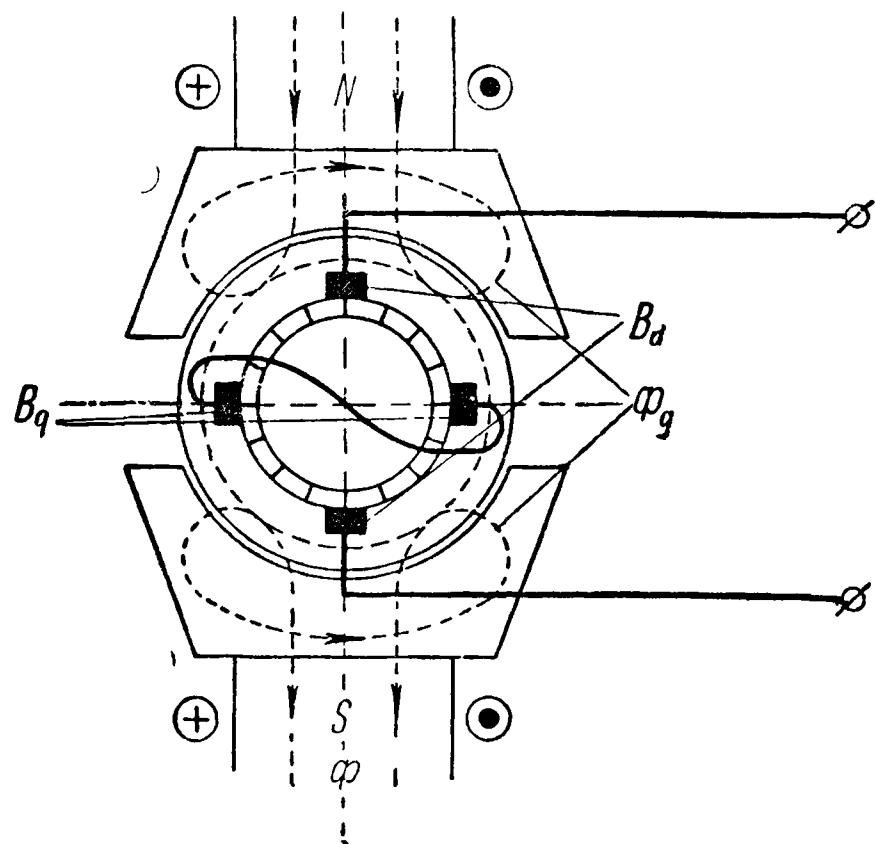
в) Одно время строили эл. машины постоянного тока с разомкнутыми якорными обмотками. Одна из таких конструкций — эл. машина постоянного тока с двойным Т-образным якорем Сименса — показана на фиг. 8; на фиг. 9 показана машина системы Шуккерта, на фиг. 10 — машина Томпсона-Густона, а на фиг. 11 — машина Бреша; все они с разомкнутыми якорными обмотками.

«Замкнутая кольцевая якорная обмотка», показанная на фиг. 7, вытеснившая разомкнутую якорную обмотку, ныне совсем вытеснена «двуслойной замкнутой обмоткой зубчатого барабанного якоря» (см. дальше).

г) При независимом возбуждении «явнополюсная эл. машина постоянного тока» допускает замену магнитных полюсов, намагничиваемых катушками постоянного тока, «искусственными постоянными магнитами».

Машину постоянного тока, выполненную с постоянными магнитами, называют «магнитоэлектрической машиной постоянного тока».

д) В «коллекторной машине постоянного тока» вследствие того, что при стационарном режиме ее работы магнитный поток якоря сохраняет неизменное направление по линии щеток, имеется возможность устроить «двуступенчатое возбуждение», перенося вторую ступень возбуждения на якорь. Такие эл. машины постоянного тока получили название «эл. машины постоянного тока с поперечным полем» (фиг. 12). Индукционная обмотка создает магнитный поток и магнитные полюсы. Щетки, поставленные по линии, перпендикулярной к оси магнитных полюсов — «поперечные щетки»  $B_q$ , замыкаются накоротко и создают рабочий поперечный магнитный поток  $\Phi_q$ . Другая пара щеток, стоящая перпендикулярно к оси магнитного потока  $\Phi_q$ , т. е. по оси основных магнитных полюсов — «продольные щетки»  $B_d$ , — служат «рабочими щетками».



Фиг. 12 Эл. машина постоянного тока с двуступенчатым возбуждением, машина с поперечным полем.

Эта эл. машина постоянного тока используется как генератор, как двигатель, как электромашинный преобразователь постоянного эл. тока в постоянный эл. ток и как электромашинный усилитель.

## 19. О физической невозможности эл. машин постоянного тока без скользящих эл. контактов

На протяжении развития эл. машины постоянного тока идея создания машины постоянного тока без скользящего эл. контакта привлекала к себе большое внимание, и ей отдали дань многие видные электрики. Ныне физическую невозможность такой машины постоянного тока нужно считать столь же прочно установленной, как и невозможность создания «вечного движения» (perpetuum mobile). Этот вопрос подробно разбирается в трудах академика Б. Ф. Миткевича, в частности, в [Л. 3]. Математическая трактовка проблемы дана в работе Г. А. Акимова-Перетц [Л. 4].

Невозможность такой машины вытекает, между прочим, непосредственно из электроэнергетических теорем Пуанкаре-Баркгаузена, согласно которым для преобразования механической энергии в электрическую энергию постоянного тока и для обратного преобразования необходимо иметь в системе эл. контуров, предназначенных для этой цели, не только изменяющуюся индуктивность, но и изменяющееся эл. сопротивление, что осуществимо только при помощи скользящих эл. контактов.

## 20. Практическое значение отдельных типов эл. машин постоянного тока

Из перечисленных выше (§ 18) возможных типов машин постоянного тока наибольшее значение на практике имеет «явнополюсная коллекторная машина постоянного тока», поэтому данная книга посвящена, в основном, этому типу.

---

---

## ГЛАВА I

# СОВРЕМЕННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### А. СВЕДЕНИЯ ОБЩЕГО ХАРАКТЕРА

Настоящая книга посвящена, в основном, как указывалось во введении, коллекторным электромашинным генераторам и двигателям постоянного тока, называемым в дальнейшем сокращенно генераторами и двигателями постоянного тока и, совместно, машинами постоянного тока. Во многих случаях мы будем говорить еще короче: генератор, машина, опуская указание системы постоянного тока как само собой подразумевающееся в данной книге. При этом мы будем иметь в виду, главным образом, современные машины постоянного тока, понятие о которых разъясняется ниже, в § 31.

#### 21. Главные составные части и главные детали машин постоянного тока и их наименования; удельные веса машин

а) Главные составные части машин. На фиг. 13 представлена небольшая по мощности машина постоянного тока Ленинградского электромашиностроительного завода «Электросила» имени С. М. Кирова, а на фиг. 14 — крупная машина того же завода.

Всякая вращательная эл. машина состоит, как правило, из двух составных частей: неподвижной части — статора, располагаемой обычно снаружи, и вращающейся внутренней части — ротора. Статор и ротор представляют собой два основных органа двухзвенной вращательной эл. машины.

Ротор современной машины постоянного тока малой и средней мощности (начиная с 0,5 *квт*) состоит из (фиг. 13): 1) в а л а *O* и насаженных на него: 2) я к о р я *A*, 3) к о л л е к т о р а *K* и 4) в е н т и л я т о р а *V* для охлаждения машины.

В тихоходных больших машинах постоянного тока охлаждение достигается независимым вентилятором, в больших быстроходных машинах постоянного тока открытого исполнения (§ 23) достаточное охлаждение достигается вентилирующим действием вращения якоря. При закрытом исполнении машин (§ 23) применяют наружную вентиляцию (§ 24).

На наших электромашиностроительных заводах термин ротор в применении к машинам постоянного тока не используется; всю вышеперечисленную совокупность вращающихся деталей называют по имени главной из них якорем. Таким образом, на практике термин якорь имеет двоякое значение: во-первых, совокупность вращающихся частей машины постоянного тока, во-вторых, собственно якорь.

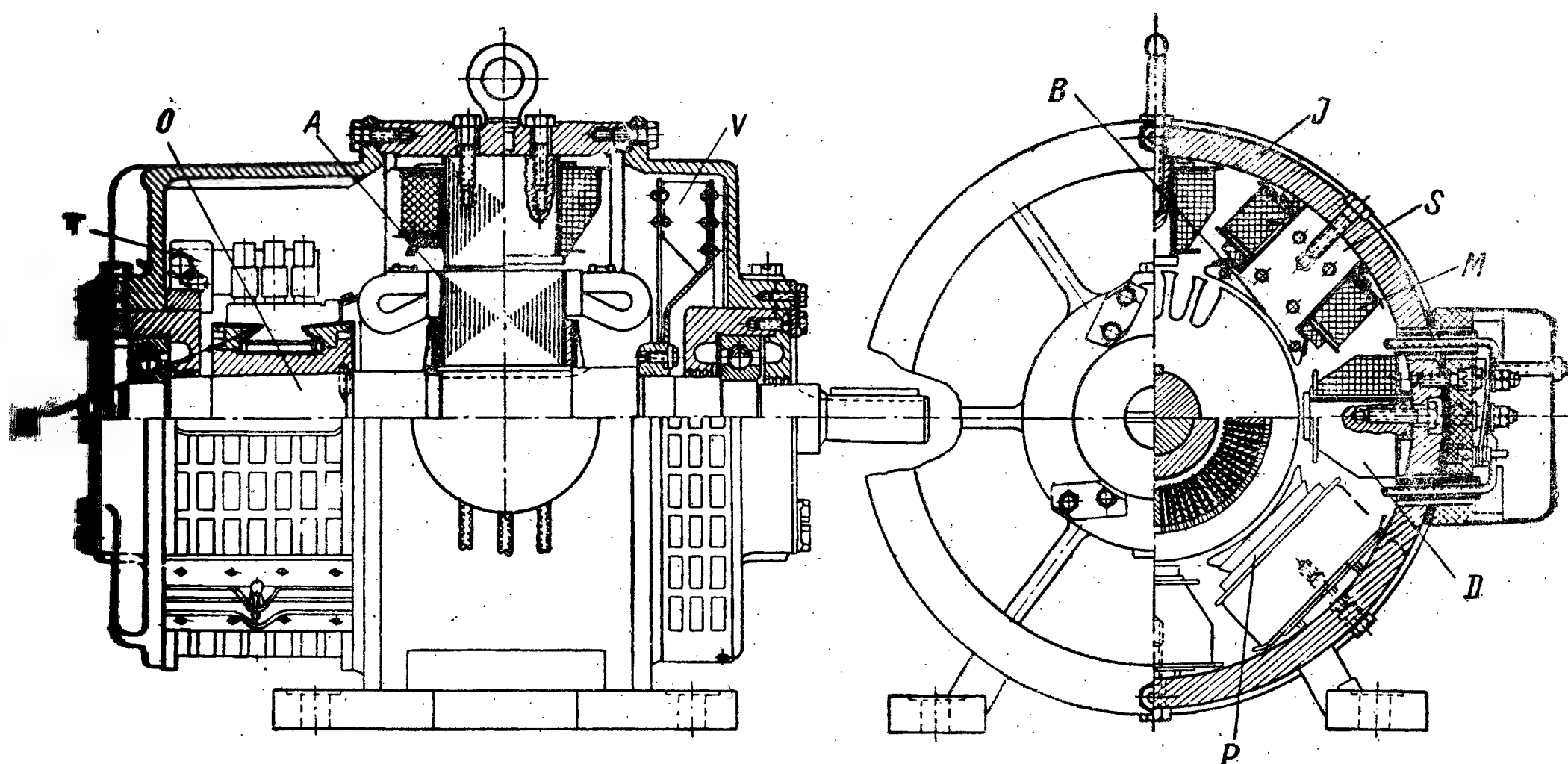
С т а т о р современной машины постоянного тока состоит из: 1) я р м а *J*, 2) г л а в н ы х, или основных, м а г н и т н ы х п о л ю с о в *P* с намагничивающими их к а т у ш к а м и *M* из изолированного или голого медного провода круглого или прямоугольного сечения<sup>1</sup> и 3) из д о б а в о ч н ы х,

---

<sup>1</sup> В крупных машинах постоянного тока катушки главных полюсов часто выполняются из голого медного провода, поставленного на ребро.

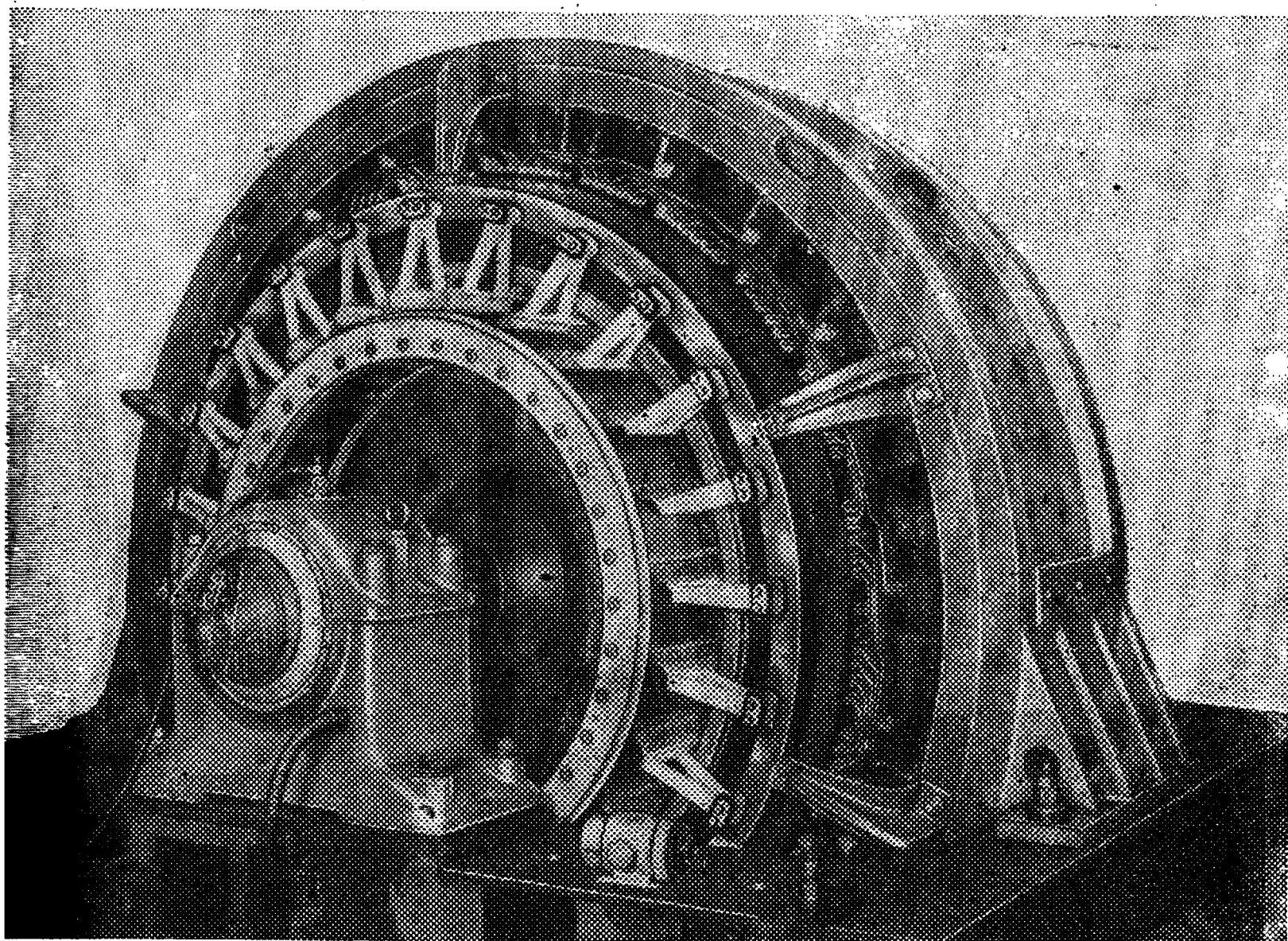


или коммутационных, магнитных полюсов  $D$  с намагничивающими их катушками из изолированного или из голого (с изоляционными прокладками) медного провода круглого или прямоугольного сечения (фиг. 13).



Фиг. 13. Машины постоянного тока типов ПН-68 и ПН-85 в горизонтальном исполнении

Термин статор в применении к машинам постоянного тока на практике не используется, вместо него пользуются термином магнитная система или индуктор. Термин ядро также заменяют на практике термином



Фиг. 14. Крупная машина постоянного тока завода «Электросила».

станна машины постоянного тока, так как в качестве конструктивной машины ядро выполняет эту роль.

б) Главные детали машины. Собственно якорь представляет собой цилиндрической формы, состоящее из большого числа дисков специаль-

ной тонкой листовой электротехнической стали, плотно спрессованных. По наружной окружности якоря равномерно располагаются полученные путем штамповки пазы или впадины, в которых укладывается и укрепляется составленная по определенным правилам электрическая цепь из изолированного медного провода круглого или прямоугольного сечения, называемая обмоткой якоря. Обмотка якоря является той частью машины постоянного тока, в которой индуцируется электродвижущая сила и протекает ток.

К о л л е к т о р имеет цилиндрическую форму и состоит из медных пластин, изолированных друг от друга и от крепящих их частей. П л а с т и н ы к о л л е к т о р а электрически соединяются с определенными точками якорной обмотки, равномерно распределенными по окружности якоря.

Г л а в н ы е, или о с н о в н ы е, магнитные полюсы состоят (фиг. 13) из сердечников полюсов  $S$  и уширенной в сторону якоря торцевой части полюса, называемой полюсным наконечником, или полюсным башмаком  $B$ ; раньше башмаки делали отдельно от сердечника полюса и привинчивали к нему винтами; ныне сердечник и башмак штампуют совместно из листовой электротехнической стали в виде пластин соответствующей формы, которые затем спрессовывают и скрепляют в монолитное тело. Главные магнитные полюсы создают основной магнитный поток машины, от перерезывания которого вращающейся якорной обмоткой в ней индуцируется э. д. с. машины.

Д о б а в о ч н ы е магнитные полюсы, имеющие узкую форму и располагаемые в промежутках между главными магнитными полюсами, делают из катаной стали, иногда их штампуют из тонких листов электротехнической стали, как и главные полюсы. С торца, обращенного к якорю, их снабжают иногда полюсным башмаком прямоугольной формы, со скосами или без них. Добавочные магнитные полюсы служат для обеспечения безискровой работы коллектора.

В больших машинах постоянного тока, предназначенных для тяжелых условий работы,<sup>1</sup> в полюсных башмаках главных магнитных полюсов, которым в этом случае придают особо развитую форму, проштамповывают ряд пазов для укладки в них компенсационной обмотки (см. фиг. 60). Она предназначена для воспрепятствования искажению формы распределения индукции основного магнитного потока в пространстве, отделяющем полюсный башмак от якоря.

Это пространство называется междужелезным пространством, или з а з о р о м. Его мы будем называть г л а в н ы м э л е к т р о м а ш и н н ы м з а з о р о м, или, кратко, зазором<sup>2</sup> и обозначать через  $\delta$ .

Компенсационная обмотка выполняется, как и прочие обмотки машины, из меди и изолируется. Обмотки добавочных полюсов и компенсационная обмотка соединяются с обмоткой якоря последовательно. О способах соединения с обмоткой якоря обмоток главных магнитных полюсов, называемых о б м о т к а м и в о з б у ж д е н и я, см. § 22.

На коллектор опираются щетки, как правило, угольные, имеющие прямоугольную форму сечения; их устанавливают по образующим цилиндрической поверхности коллектора, называемым коммутационными зонами. Обычно число коммутационных зон равно числу полюсов машины; исключение составляют четырехполюсные тяговые двигатели, подвешиваемые под кузовом вагона: они имеют только два комплекта щеток. Каждый з о н н ы й к о м п л е к т щ е т о к состоит, как правило, не менее чем из двух щеток,

<sup>1</sup> См § 31.

<sup>2</sup> Раньше его называли воздушным зазором, но ныне, с применением в некоторых эл. машинах переменного тока заполнения внутреннего пространства машины водородом (ради их лучшего охлаждения), термин воздушный зазор потерял общность и, повидимому, подлежит замене термином главный электромашинный зазор

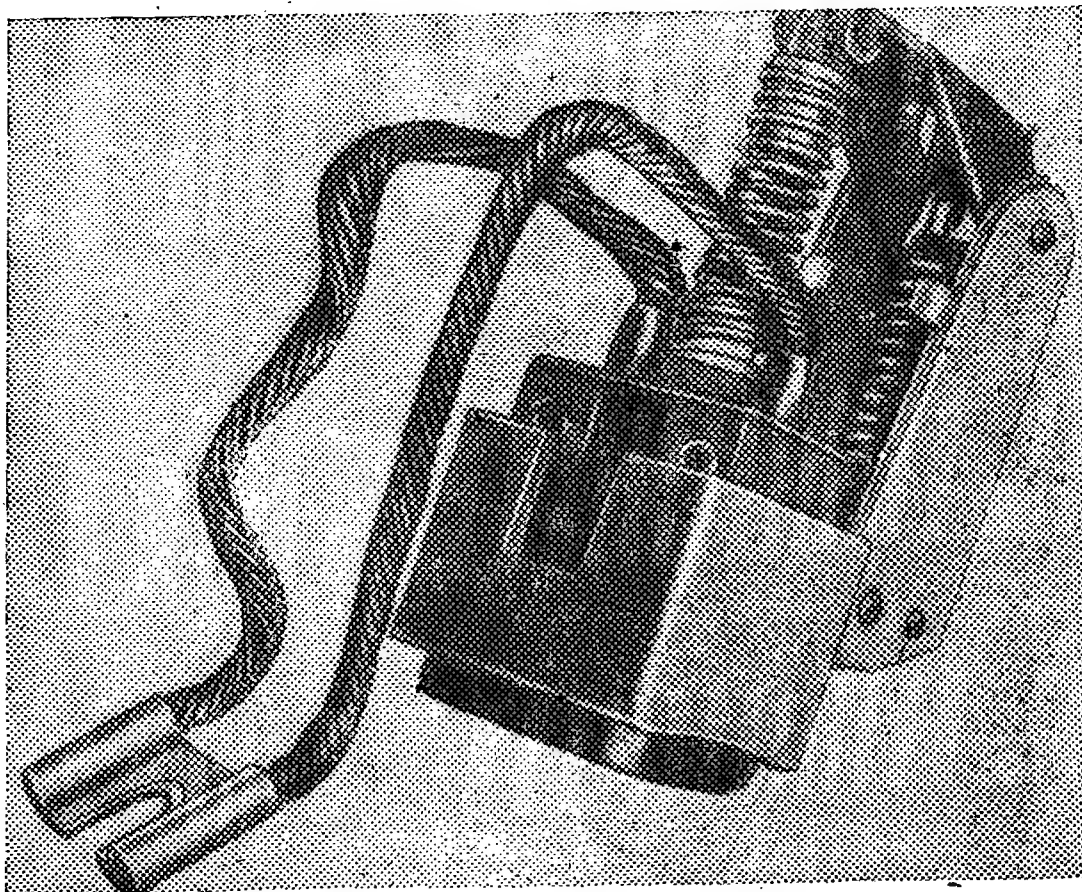


что делается по соображениям обеспечения лучшего контакта неподвижных щеток с вращающимся коллектором

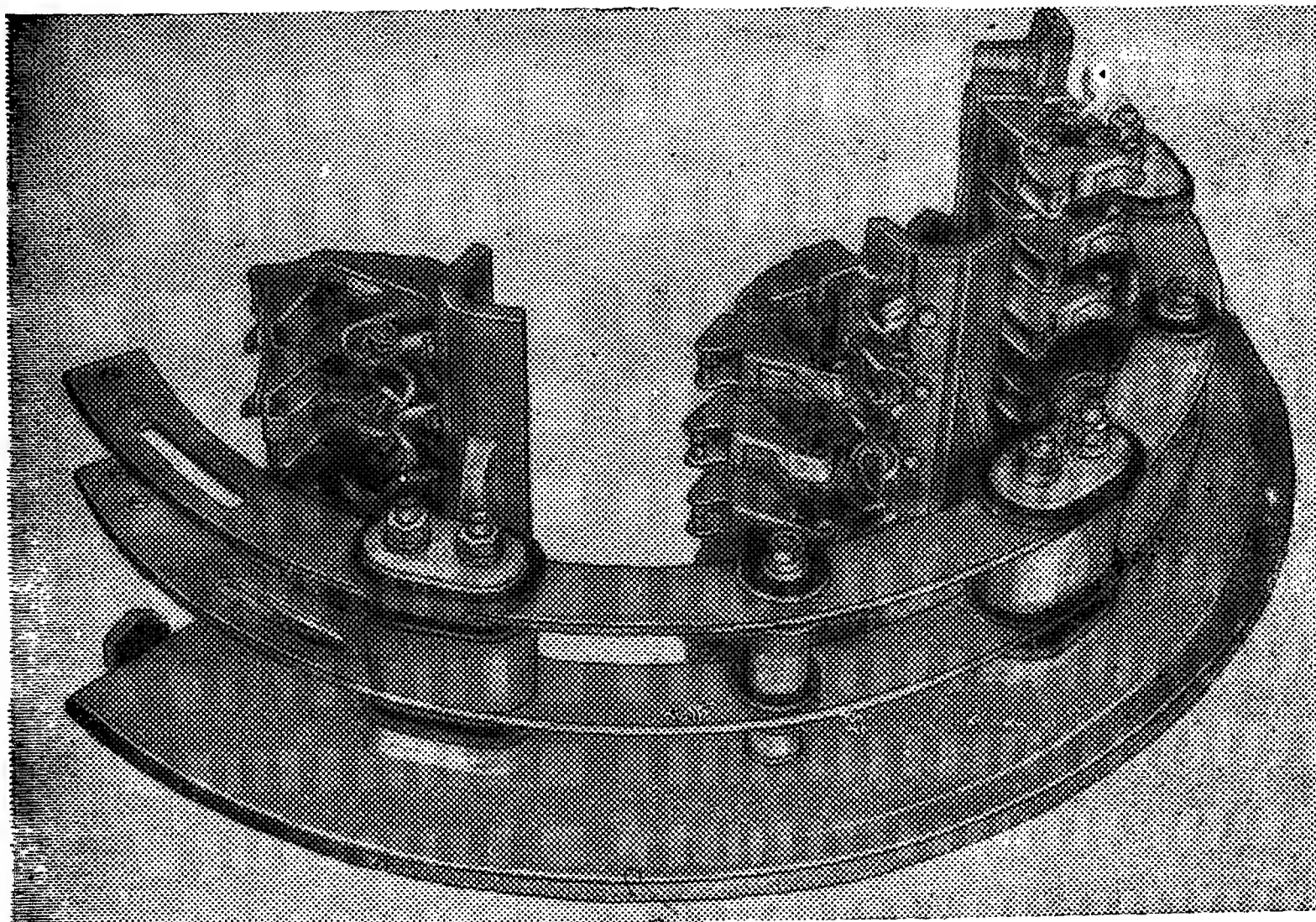
Щетки вставляют в обоймы особых щеткодержателей (фиг. 15) с пружинами, прижимающими щетки к поверхности коллектора. Щеткодержатели крепят к пальцам или к бракетам круглой или прямоугольной формы, механически связываемым друг с другом в траверсу или с упором (фиг. 16), от которых их надежно изолируют. В малых и средних машинах постоянного тока траверсы крепят к подшипникам, в больших их крепят к яру или устанавливают на фундаментную плиту машины.

Щетки одного и того же зонного комплекта электрически соединяют друг с другом, а зонные комплекты одной и той же полярности (т. е. через зону) соединяют электрически друг с другом и присоединяют к соответствующему внешнему зажиму машины.

Внешние зажимы машины укрепляют на доске зажимов, которую прикрепляют к яру машины и прикрывают предохранительной выпуклой (в малых машинах) либо круглой (в больших машинах) крышкой с отверстием внизу



Фиг. 15. Щеткодержатель



Фиг. 16. Крепление щеткодержателей к пальцам и щеточная траверса.

присоединения к зажимам проводов от эл. сети. Зажимы с крышкой образуют так называемую коробку зажимов. Доску с зажимами крупных машин крепят к фундаменту машины, либо к стояковому подшипнику, не надевая предохранительной коробки.

Отметим, что вместо «зонный комплект щеток» обычно говорят «щетка», подразумевая под этим совокупность всех щеток одной коммутационной зоны.

Совокупность всех зонных комплектов щеток данной машины образует ее полный комплект щеток, который обычно называют сокращенно комплектом щеток.

Щетки, щеткодержатели, пальцы (или бракетты) и траверса (или суппорт) составляют так называемый токособирательный аппарат машины постоянного тока. В него входят также соединения между собой зонных комплектов щеток одной и той же полярности.

Концы вала якоря машины, называемые шейками вала, вставляют в подшипники. В небольших и средних машинах подшипники (ныне, как правило, подшипники качения, иногда скользящего трения) укрепляют в подшипниковых щитах, которые в то же время выполняют роль защиты машины от внешних воздействий, а также служат для полного закрытия машины, если она выполняется крышкой (§ 23)

В больших машинах постоянного тока устраивают стояковые подшипники скользящего трения и укрепляют их на фундаментной плите, предназначенной для установки ярма машины (фиг. 14).

Малые машины постоянного тока с подшипниковыми щитами не имеют, как правило, фундаментной плиты, их устанавливают на болтах, которые крепят к бетонному или кирпичному фундаменту, или к полу, или на особых балочках, называемых салазками.

Иногда генераторы, а также двигатели, имеют всего один подшипник; другой конец вала имеет фланец или обрабатывается под насадку полумуфты для соединений со свободным концом вала приводного двигателя (в случае генератора) или механизма (в случае двигателя).

в) Удельные веса машин. Вес меди, идущей на изготовление всех обмоток машины и коллектора, вес электротехнической стали, идущей на изготовление дисков якорного железа, а также вес остальных деталей машины, размеры которых определяются электрическим расчетом, обычно подсчитывают отдельно от весов прочих деталей машины и называют (в сумме) весом активных материалов машины. Все прочие материалы, идущие на изготовление машины, называют неактивными, или конструктивными, материалами; они идут для крепления активных материалов машины и на ее конструктивное оформление, при этом вес изоляции обычно не учитывается ввиду его относительной, по сравнению с прочими весами, незначительности. Сумма весов активных и неактивных материалов составляет полный вес машины. Деля полный вес машины и вес ее активных материалов, выраженные в килограммах, на мощность машины в киловаттах, получают удельные веса машины в *кг/квт* — полный и активных материалов. Отношение суммарного веса машины к весу активных материалов представляет собой так называемый конструктивный коэффициент машины. Эти цифры служат для оценки машин при их сравнении и для оценки прогресса в построении машин за определенный промежуток времени. Так, если сравнить полные удельные веса двигателя постоянного тока мощностью порядка 5 л. с. (около 3,7 *квт*) при 1500 *об/мин* постройки начала девяностых годов прошлого века, когда машина постоянного тока приняла современную конструкционную форму, и последующих годов, то получим табл. 1.

Таблица 1

Сравнение удельных весов двигателей постоянного тока

Год выпуска	1889	1901	1924	1926	1930
Мощность, <i>квт</i> . . . . .	3,7	3,7	4,05	3,3	3,7
Вес, <i>кг/квт</i> . . . . .	41,9	29,2	20,5	18,8	11,3



Столь значительные успехи, достигнутые в построении машин, объясняются в основном усовершенствованием методов расчета, улучшением качества применяемых материалов и усовершенствованием охлаждения.

## 22. Способы соединения возбуждающей обмотки с обмоткой якоря

а) Генераторы постоянного тока делают или с **н е з а в и с и м ы м** **в о з б у ж д е н и е м** или с **с а м о в о з б у ж д е н и е м**. При независимом возбуждении (фиг. 17, а) цепь возбуждающей обмотки питается от независимого источника постоянного тока, т. е. либо от сети постоянного тока, питаемой другим генератором постоянного тока, либо от аккумуляторной батареи, либо от генератора постоянного тока, специально предназначенного для питания возбуждающей обмотки данного генератора; мощность такого вспомогательного генератора, называемого **в о з б у д и т е л е м**, составляет всего несколько процентов от мощности того генератора, обмотку возбуждения которого он питает. Если возбудитель жестко соединяется с возбуждаемым генератором, то его называют **п р и с т р о е н н ы м** **в о з б у д и т е л е м**.

Самовозбуждающиеся генераторы постоянного тока могут быть трех типов. Если цепь возбуждающей обмотки присоединена к зажимам генератора (фиг. 17, б), то имеем **г е н е р а т о р** с **п а р а л л е л ь н ы м** **в о з б у ж д е н и е м** (или генератор параллельного возбуждения), или **п а р а л л е л ь н ы й** **г е н е р а т о р**; обычно его называют **ш у н т о в ы м** **г е н е р а т о р о м** **п о с т о я н н о г о** **т о к а**.

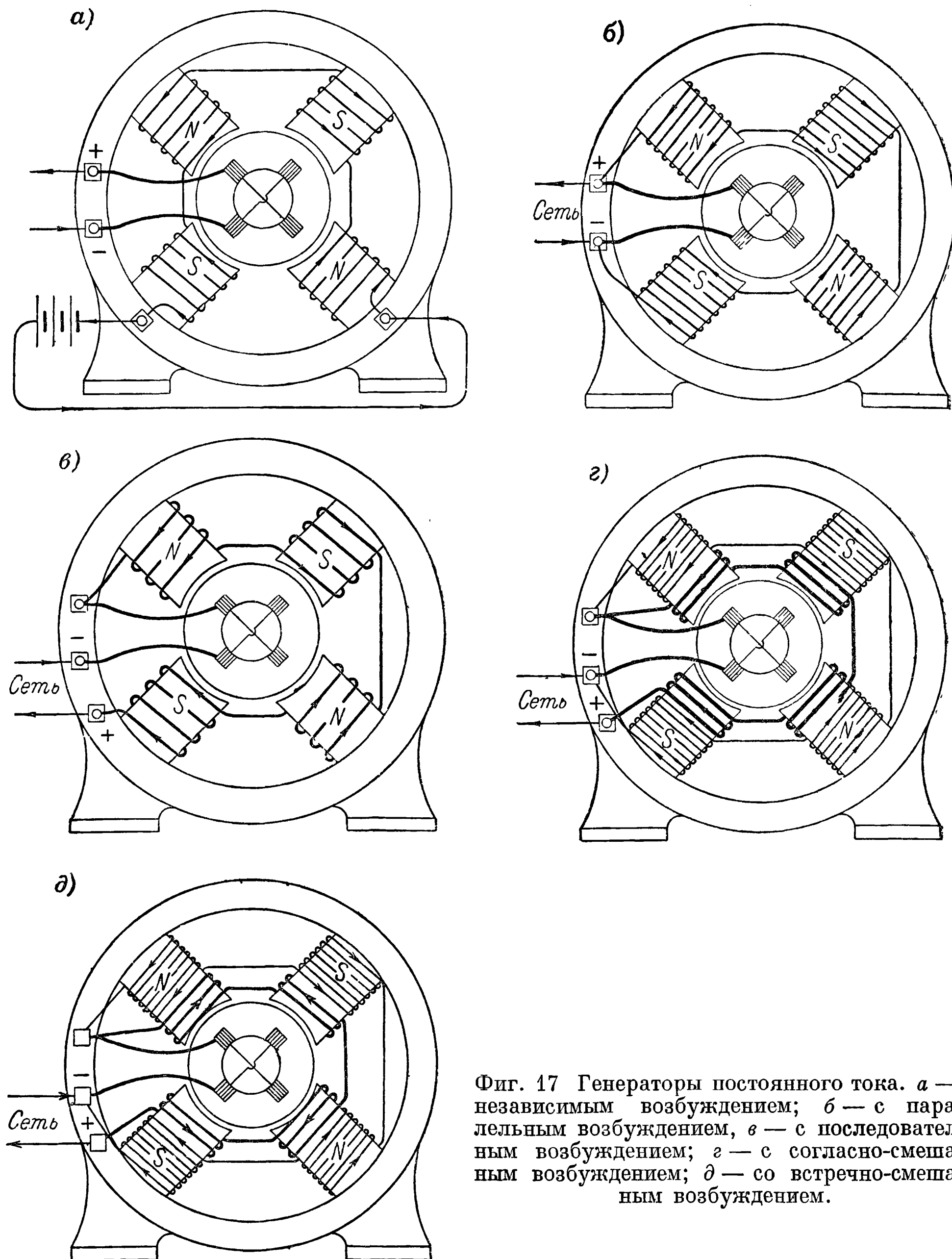
Если цепь возбуждающей обмотки соединяется с цепью якоря последовательно (фиг. 17, в), то имеем **г е н е р а т о р** с **п о с л е д о в а т е л ь н ы м** **в о з б у ж д е н и е м** (или генератор последовательного возбуждения), или **п о с л е д о в а т е л ь н ы й** **г е н е р а т о р**; иногда его называют **с е р и е с ь н ы м** **г е н е р а т о р о м** **п о с т о я н н о г о** **т о к а**. В некоторых случаях устраивают две обмотки возбуждения (фиг. 17, г), располагая на каждом основном полюсе по две намагничивающие катушки. Одни из этих катушек, по одной на каждом полюсе, соединяются последовательно и составляют **ц е п ь** **п а р а л л е л ь н о г о** **в о з б у ж д е н и я**, которая присоединяется к зажимам якоря **п а р а л л е л ь н о**, другие включаются в цепь якоря последовательно (фиг. 17, г). **П а р а л л е л ь н а я** **в о з б у ж д а ю щ а я** **о б м о т к а** играет главную роль, последовательная **ж е** создает лишь дополнительное намагничивание, восстанавливающее напряжение на зажимах генератора, которое (как увидим дальше) при наличии **т о л ь к о** **о д н о й** **п а р а л л е л ь н о й** **о б м о т к и** понижается немного с ростом нагрузки генератора.

Генератор постоянного тока с указанными двумя возбуждающими обмотками является генератором с согласно-смешанным возбуждением, или **с о г л а с н о**-**с м е ш а н н ы м** **г е н е р а т о р о м** (фиг. 17, г); иногда его называют **к о м п а у н д н ы м** **г е н е р а т о р о м** **п о с т о я н н о г о** **т о к а**.

Иногда, с целью покрытия падения напряжения в сети, питаемой генератором, требуется, чтобы напряжение генератора постоянного тока возрастало **н а г р у з к о й**, такой генератор называют **п е р е к о м п а у н д и р о в а н н ы м**. Иногда требуется, наоборот, чтобы напряжение генератора падало **б о л ь ш е** **з н а ч и т е л ь н о**, чем при наличии только одной параллельной возбуждающей обмотки. Такие случаи бывают при параллельной работе генератора с аккумуляторной батареей, когда желательно, чтобы все перегрузки сети брала на **с е б я** **а к к у м у л я т о р н а я** **б а т а р е я**. Для указанной цели последовательную возбуждающую обмотку включают так, чтобы она действовала размагничивающим **о б р а з о м** (фиг. 17, д) (навстречу параллельной возбуждающей обмотке). Такой генератор называют **г е н е р а т о р о м** **в с т р е ч н о**-**с м е ш а н н о г о** **в о з б у ж д е н и я**, или **в с т р е ч н о**-**с м е ш а н н ы м** **г е н е р а т о р о м**.



Присоединение параллельной возбуждающей обмотки можно выполнить либо так, как показано на фиг. 18, а, — получаем короткое ответвление или короткий шунт, либо так, как на фиг. 18, б, — длинное ответвление (длинный шунт).

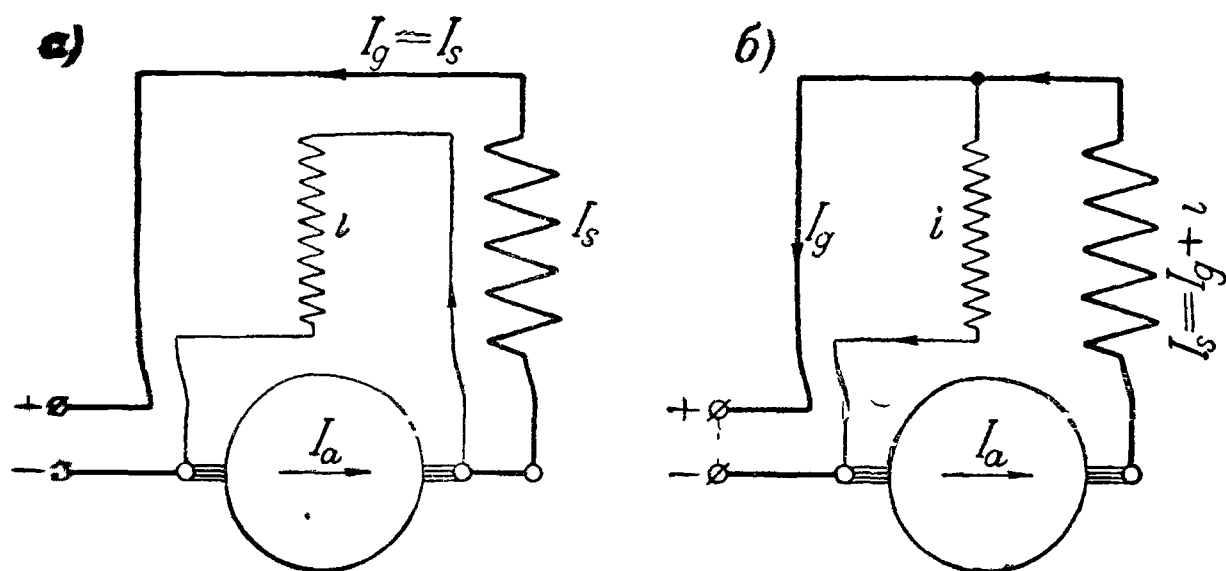


Фиг. 17 Генераторы постоянного тока. а — с независимым возбуждением; б — с параллельным возбуждением, в — с последовательным возбуждением; г — с согласно-смешанным возбуждением; д — со встречно-смешанным возбуждением.

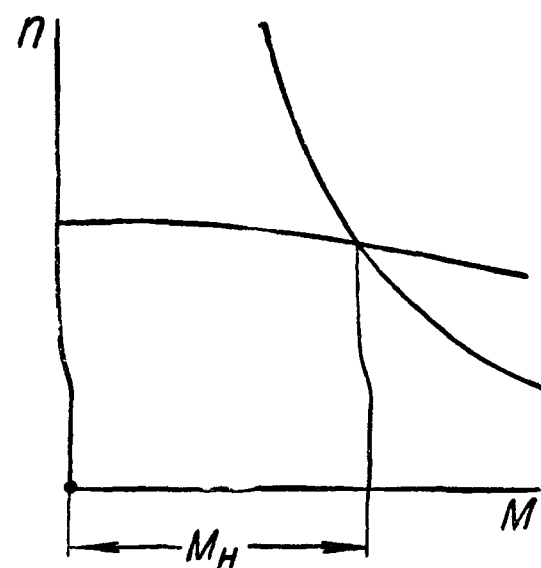
б) Вследствие принципа энергетической обратимости эл. машины каждому типу самовозбуждающегося генератора постоянного тока соответствует такой же тип двигателя постоянного тока, а потому имеем параллельные (или шунтовые), последовательные (или серийные), согласно-смешанные и встречно-смешанные двигатели постоянного тока. Так как параллельный двигатель, как правило,

присоединяется к сети неизменного напряжения, то между ним и двигателем независимого возбуждения практически нет никакой разницы. Разница получается только в случае, когда цепь возбуждения двигателя присоединяется к независимому источнику энергии постоянного тока.

в) Как увидим дальше, изменение с нагрузкой скорости вращения  $n$  параллельного и последовательного двигателей постоянного тока (с к о р о с т - ш а я х а р а к т е р и с т и к а двигателя постоянного тока, или зависимость  $n$  от тока якоря) имеет столь отличный и характерный вид, что названия шунтовой и серийный двигатель стали применять и к двигателям переменного тока, независимо от схемы включения их обмоток, а лишь



Фиг. 18. Схемы соединения обмотки возбуждения с якорной цепью генератора со смешанным возбуждением.  
а — короткий шунт, б — длинный шунт



Фиг. 19. Скоростные характеристики двигателей постоянного тока.

в зависимости от того, какому из двигателей постоянного тока они соответствуют по своей скоростной характеристике. Поэтому, во избежание недоразумений, мы считаем целесообразным применять термины шунтовой и серийный двигатель (любого рода тока) в зависимости от того, имеет ли двигатель легкая падающую (шунтовую) или резко падающую (серийную) скоростную характеристику (фиг. 19), по схеме же включения возбуждающей и якорной обмотки — именовать двигатели и генераторы параллельными, последовательными и смешанными. Этих наименований будем придерживаться в дальнейшем.

### 23. Способы защиты машин постоянного тока от внешних воздействий

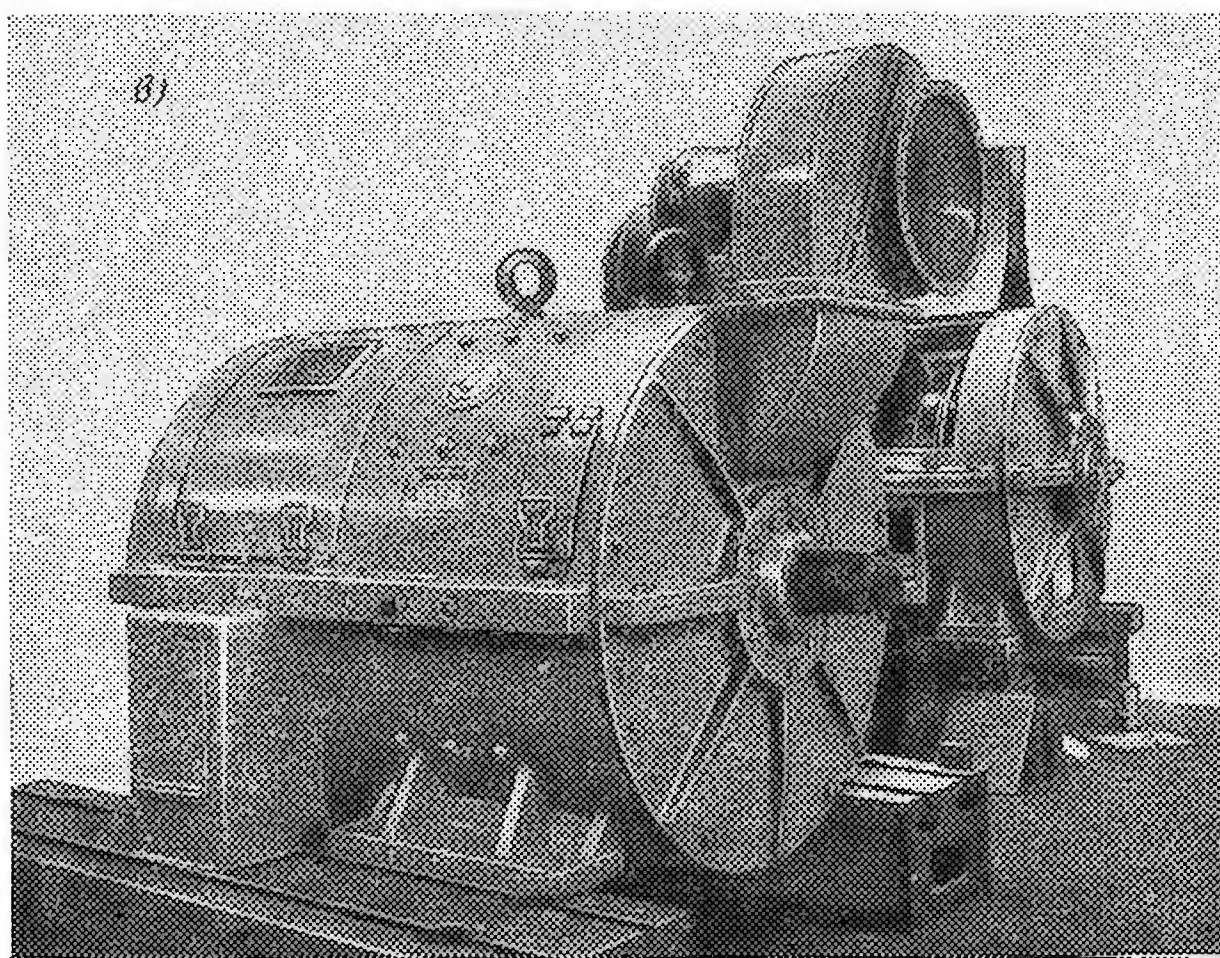
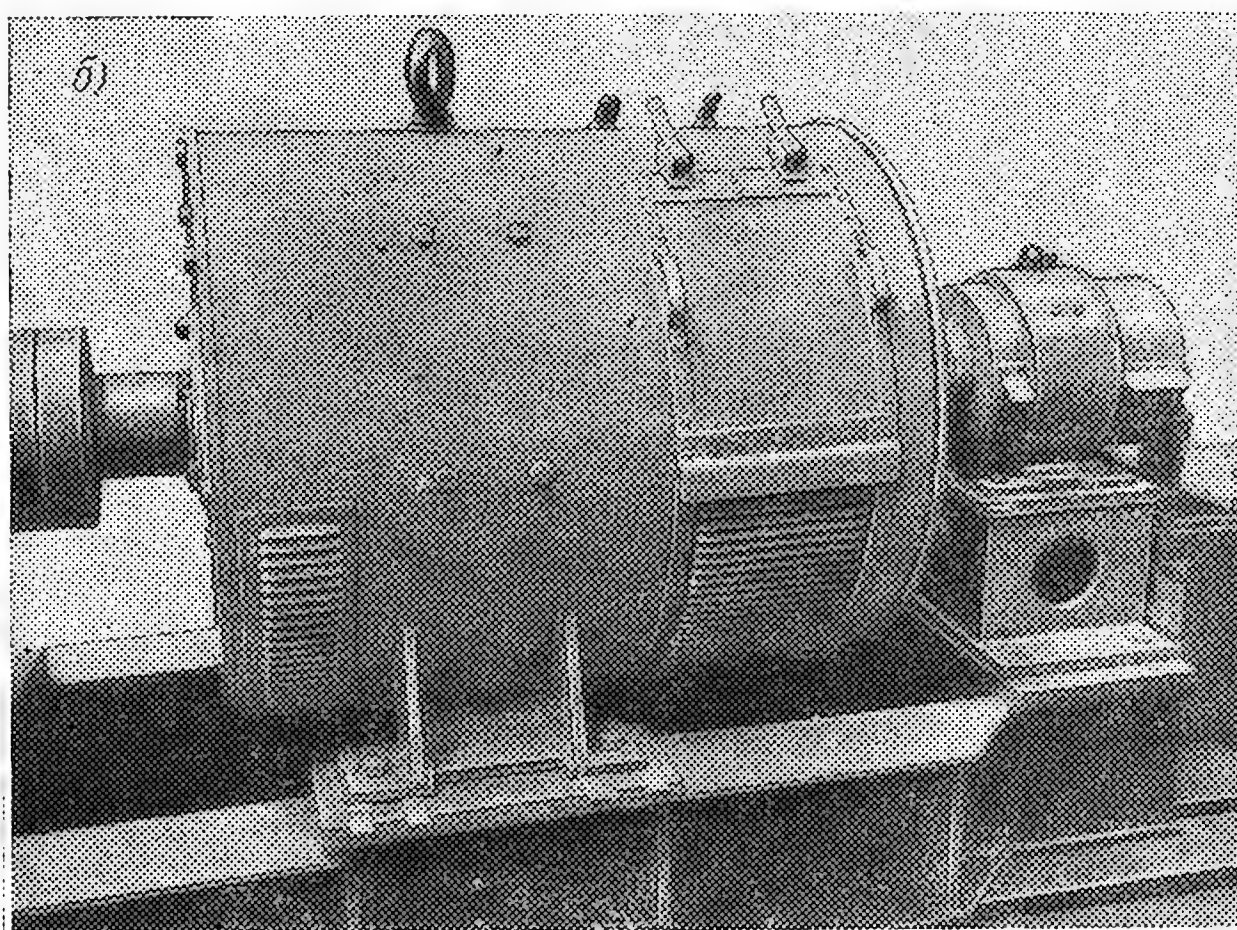
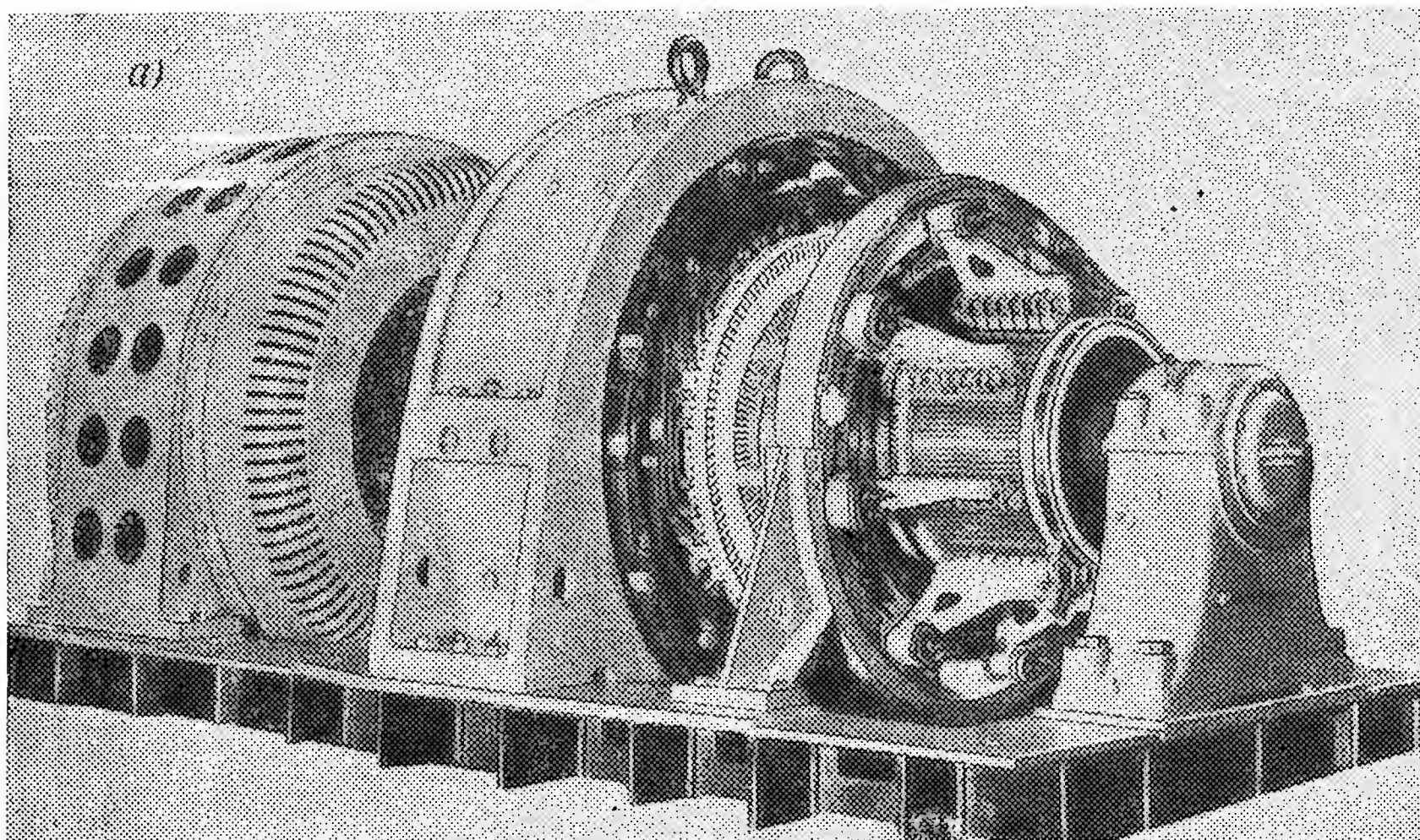
С точки зрения защиты от внешних воздействий различают следующие основные формы исполнения машин постоянного тока: открытое, защищенное, взрывозащищенное, водозащищенное, герметическое, взрывобезопасное, газонепроницаемое.

а) О т к р ы т а я э л. м а ш и н а — эл. машина, выполненная без специальных приспособлений для предохранения от случайного прикосновения к вращающимся и к токоведущим частям, а также не имеющая специальных приспособлений для предотвращения попадания внутрь машины посторонних предметов (фиг. 20, а).

Генераторы открытого типа устанавливают в особых помещениях (машинных залах), доступ в которые разрешается лишь определенному квалифицированному персоналу или под его наблюдением. Двигатели открытого типа применяются лишь в таких рабочих помещениях, в которых вполне гарантируется их сохранность, так и безопасность рабочего персонала.

б) З а щ и щ е н н а я э л. м а ш и н а — эл. машина, снабженная специальными приспособлениями — щитами — для предупреждения от случайного прикосновения к ее вращающимся и токоведущим частям, а также для предотвращения попадания внутрь машины посторонних предметов (фиг. 20, б).





Фиг 20. Некоторые типы машин постоянного тока:  
а — открытая,  
б — защищенная,  
в — водозащищенная



Этот тип защиты предусматривает иногда приспособления для предохранения внутренних частей машины от попадания водяных капель, падающих отвесно.

в) Брызгозащищенная эл. машина — эл. машина, снабженная приспособлениями для предохранения от попадания внутрь ее водяных капель, падающих под углом до 45° к вертикали с любой стороны.

г) Водозащищенная эл. машина — защищенная эл. машина, выполненная таким образом, что при обливании ее волной или струей воды под давлением вода не проникает внутрь машины (фиг. 20, в).

д) Герметически закрытая эл. машина, — выполненная таким образом, что при полном погружении ее в воду исключается всякое общение между внутренним пространством машины и водой

е) Взрывобезопасная эл. машина — имеет такое исполнение, которое защищает от распространения взрыва внутри машины за пределы корпуса

ж) Газонаполненная эл. машина — герметическая эл. машина, внутреннее свободное пространство которой заполнено соответствующим газом, имеющим давление большее, чем газовая среда или жидкость, окружающая машину извне

## 24. Способы охлаждения машин постоянного тока

По способам охлаждения различают следующие исполнения машин постоянного тока, сохраняющие силу и для машин переменного тока.

а) Эл. машина с естественным самоохлаждением, или естественно охлаждаемая эл. машина, — открытая эл. машина. Засос воздуха из окружающей среды производится только за счет вентилирующего действия вращающихся частей, причем на них нет никаких специальных приспособлений для усиления этого действия (фиг. 20, а)

Разновидностью ее является.

Эл. машина с усиленным самоохлаждением — открытая или защищенная эл. машина, снабженная специальными устройствами (вентилирующими крыльшками) на внутренних вращающихся частях для усиления самоохлаждения, но не имеющая встроенного вентилятора

б) Эл. машина с самовентиляцией — эл. машина, выполненная со встроенным вентилятором (вентилятор на валу машины, фиг. 13)

При этом возможны следующие разновидности

1) Самовентилирующаяся эл. машина с внутренней проточной вентиляцией — защищенная или закрытая эл. машина, в которой вентиляция осуществляется все время свежим воздухом внешней среды. При закрытом исполнении машины свежий воздух подводится по специальной трубе или по каналу, а нагретый в машине воздух выпускается в помещение, где установлена машина, или наружу.

2) Самовентилирующаяся эл. машина с внутренней замкнутой вентиляцией — закрытая эл. машина, в которой вентиляция производится все время одним и тем же объемом воздуха, который циркулирует по замкнутому циклу через внутренние части эл. машины и через охладитель (обычно водяной), встроенный в систему вентиляции

3) Эл. машина с наружной самовентиляцией, или обдуваемая эл. машина — закрытая эл. машина, имеющая на валу наружный вентилятор, засасывающий внешний воздух и продувающий его через каналы, устроенные в станине эл. машины и не сообщающиеся с внутренним пространством машины

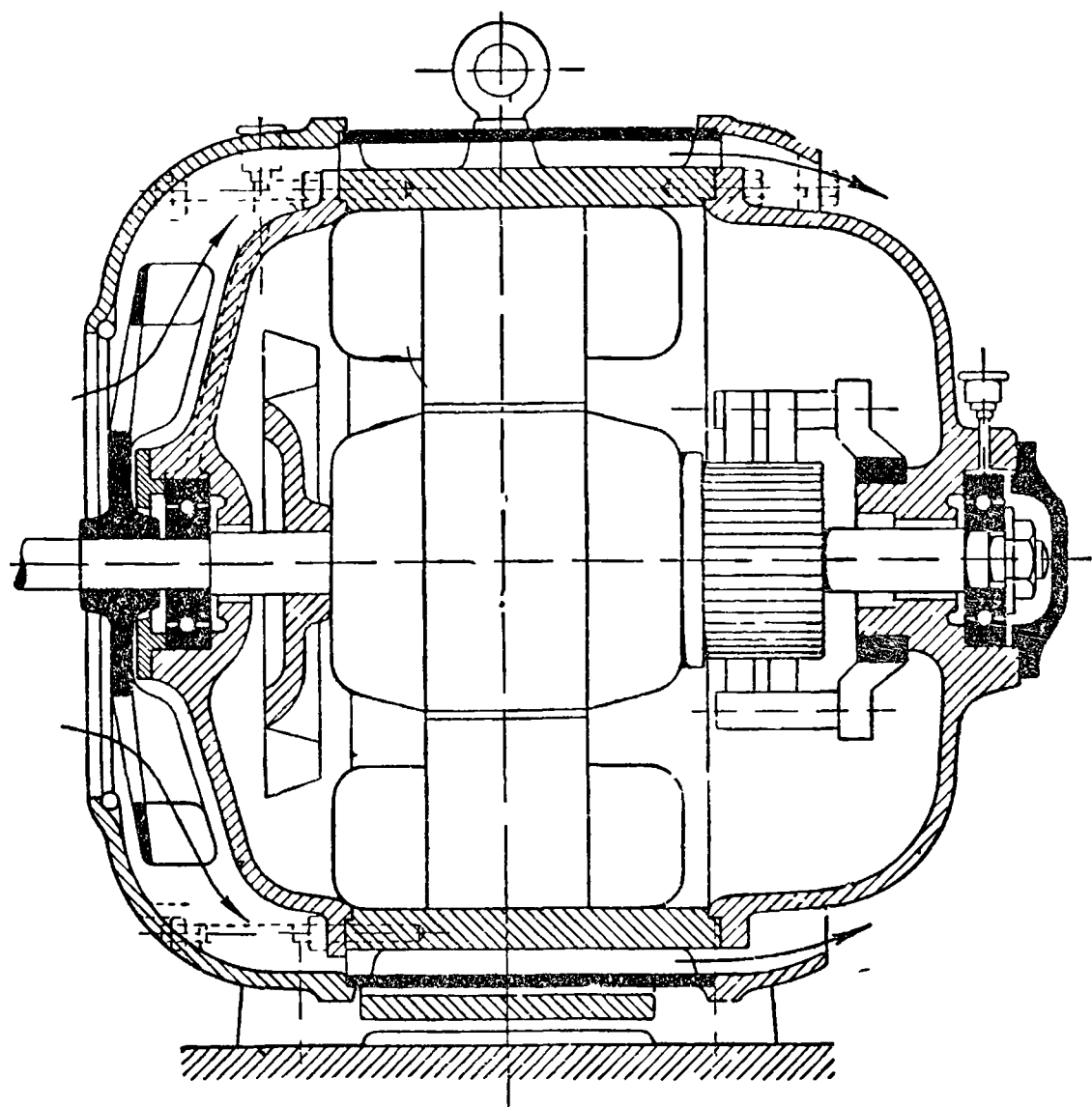
В больших обдуваемых машинах устраивают, кроме того, второй, внутренний вентилятор, выравнивающий температуру внутри машины (фиг. 21).

Эта конструкция, появившаяся в конце второго десятилетия текущего века, удачно разрешила вопрос о закрытых эл. двигателях, надобность в кото-

рых была велика. Дело в том, что мощность закрытого электродвигателя падает до 80—25% от мощности при открытом исполнении (80% для малых двигателей). Вследствие этого выполнение закрытых двигателей на мощностях, превышающие 150 кВт, было нецелесообразным. Применение обдуваемого исполнения позволило довести мощность закрытых двигателей до 60—100%

их мощности при открытом исполнении

в) Эл. машина с независимым охлаждением — эл. машина, охлаждение которой производится воздухом, подаваемым внутрь машины с помощью труб или иных приспособлений от вентилятора, работающего независимо от машины.



## 25. Конструктивные исполнения машин постоянного тока

Большинство машин постоянного тока выполняют с горизонтальным валом — горизонтальные эл. машины. Если машина выполнена с вертикальным валом, то ее называют вертикальной эл. машиной

Фиг. 21. Машина постоянного тока с наружной самовентиляцией и внутренним вентилятором.

ной (фиг. 22); один из двух подшипников ее должен быть выполнен в виде упорного для удержания ротора в вертикальном положении.

Иногда небольшие горизонтальные двигатели постоянного тока делают фланцевыми. В них один из двух подшипниковых щитов имеет вид фланца, при помощи которого двигатель крепится к механизму (фиг. 23).

Следует еще отметить балансирное исполнение машин постоянного тока, предназначенных служить электромашинными тормозами преимущественно при испытании двигателей внутреннего сгорания. Такие машины делают относительно больших мощностей и с широкой регулировкой скорости. При балансирном исполнении машина получает четыре подшипника: два — для ротора, два — для статора (фиг. 24). К статору приделывается плечо с грузом, и ему дается при помощи вилки, охватывающей плечо, возможность поворота на некоторый угол при нарушении равновесия тормоза; равновесие восстанавливают, подбирая груз.

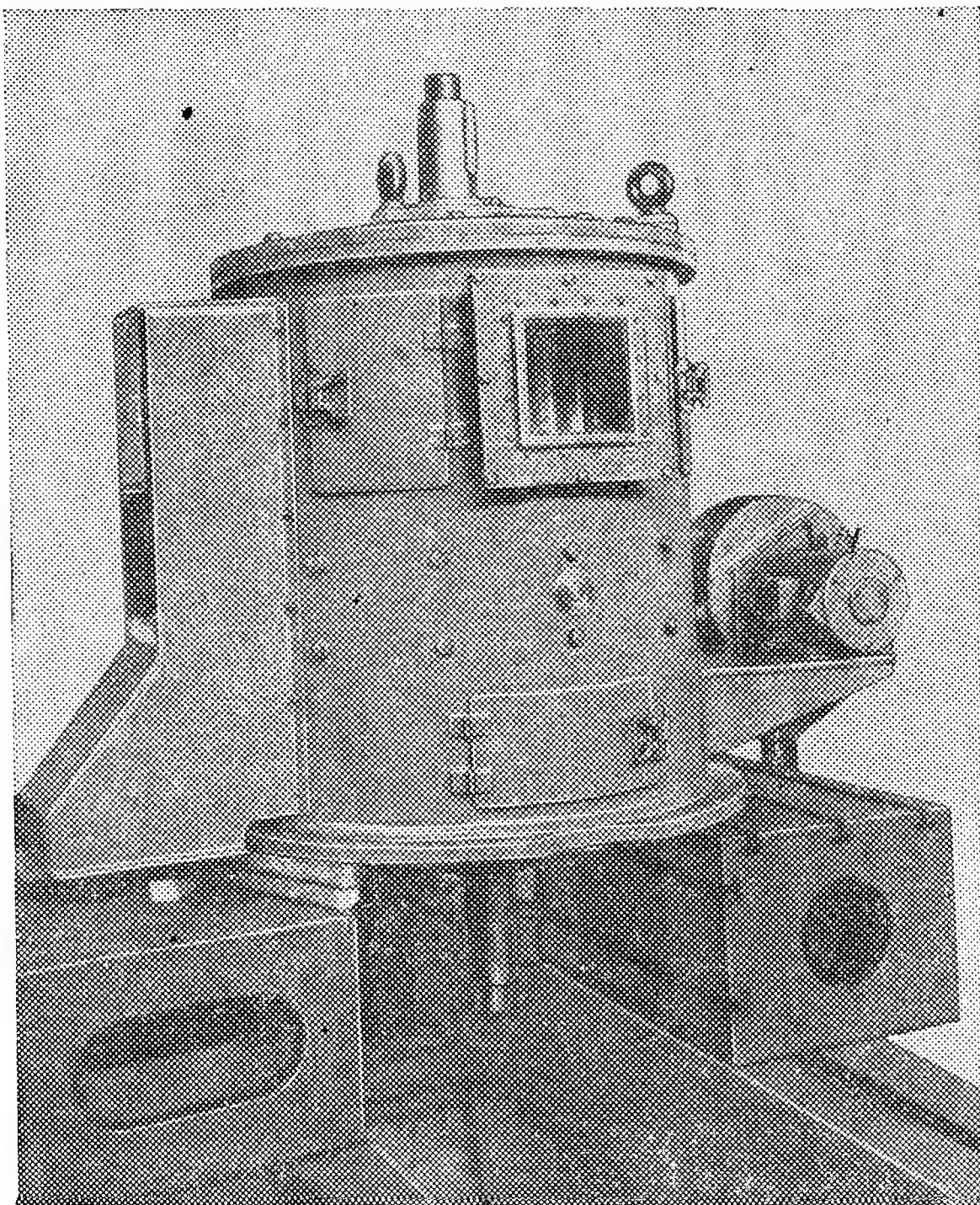
## 26. Области применения машин постоянного тока и достигнутые мощности

Как уже отмечалось во введении, с конца 90-х годов прошлого столетия началось постепенное вытеснение машин постоянного тока машинами переменного тока как из области генерирования эл. энергии при помощи первичных двигателей (паровых, гидравлических и внутреннего сгорания), так и из области передачи эл. энергии на дальние расстояния и ее использования в промышленности, транспорте и военном деле.

В вытеснении генераторов постоянного тока из области непосредственного генерирования эл. энергии основную роль сыграли два обстоятельства: во-первых, преимущество в концентрации производства эл. энергии на крупных эл. станциях общественного пользования в небольшом числе мощных агрегатов

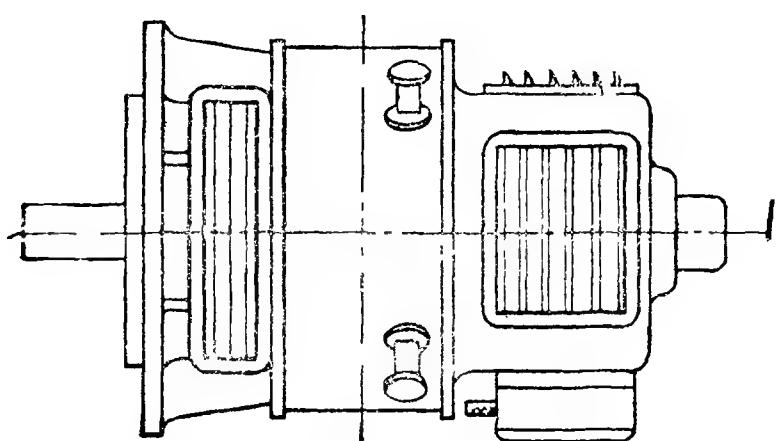


и, во-вторых, появление в первом десятилетии текущего века технически совершенной паровой турбины, сменившей паровую машину и требовавшей повышенных скоростей вращения. Этим требованиям генератор постоянного

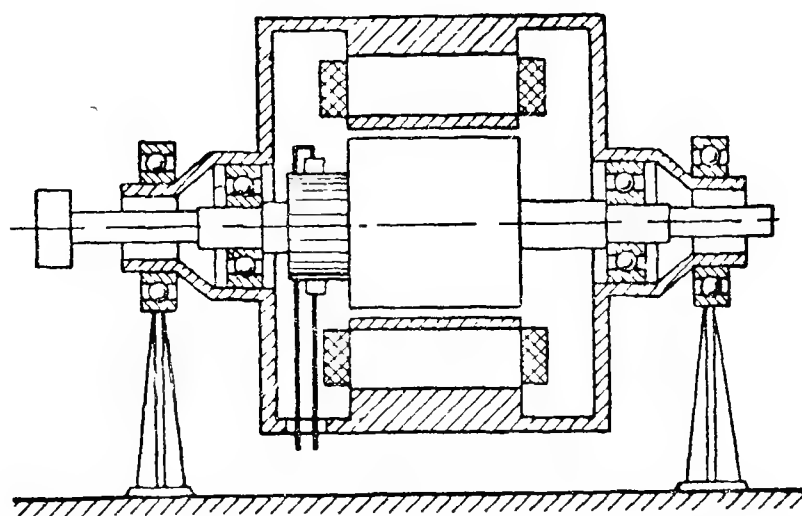


Фиг. 22 Вертикальная машина постоянного тока.

тока удовлетворить не смог, и в настоящее время генераторы постоянного тока почти полностью вытеснены из области непосредственного производства эл. энергии. В тех случаях, когда требуется энергия постоянного тока для питания двигателей постоянного тока, устанавливают двигатели-генераторы.



Фиг. 23. Фланцевая машина постоянного тока



Фиг. 24 Машина постоянного тока в балансирующем исполнении.

аторы, преобразующие энергию переменного тока в энергию постоянного тока, либо ртутные выпрямители, которые, начиная со второго десятилетия XX века, почти полностью вытеснили собой ранее широко применявшиеся одноякорные преобразователи (машины переменного-постоянного тока) и ныне вытесняют во многих случаях и двигатели-генераторы переменного-постоянного тока.

Мощности генераторов постоянного тока в двигателях-генераторах не превосходят 6000 *квт* в одной машине, и когда требуется большая мощность, устанавливают двигатель переменного тока, сочлененный с двумя или с тремя одинаковыми генераторами постоянного тока.

Двигатели постоянного тока пока прочно удерживаются в тех областях, где требуется запасание эл. энергии с целью ее последующего использования, так как это возможно лишь при помощи э л е к т р и ч е с к и х а к к у м у л я т о р о в п о с т о я н н о г о т о к а. Здесь прежде всего нужно упомянуть, например, безрельсовый и бесконтактный электрический транспорт при помощи небольших аккумуляторных тележек, получивших название э л е к т р о к а р, их применяют для внутризаводского транспорта и в пределах станционных площадок железных дорог, встречается применение и железнодорожных аккумуляторных электровозов на крупных железнодорожных узлах.

Вторая область применения двигателей постоянного тока, где они имеют пока что доминирующее распространение, это городские железные дороги — наземные (трамвай) и подземные (метрополитен), городские безрельсовые пути сообщения (троллейбусы) и междугородные эл. железные дороги.

Третья область применения двигателей постоянного тока это установки, в которых требуется либо строгое поддержание постоянства скорости вращения (производство писчей бумаги), либо широкая регулировка скорости вращения, частые значительные перегрузки и реверс (вращение во взаимнообратных направлениях). Это, прежде всего, прокатные металлургические установки, шахтные подъемники в горном деле, мостовые заводские краны, привод аэродинамических труб и ряд подобных установок (например, электромашинные тормоза, экскаваторы, драглайны). В этих случаях преимущество, несомненно, за двигателями постоянного тока, так как пока нет еще столь гибких и совершенных двигательных установок переменного тока, которые позволили бы им успешно конкурировать с двигателями постоянного тока. Однако попытки заменить двигатели постоянного тока двигателями переменного тока в перечисленных областях все время происходят, и например, в недавнее время, в связи с потребностью в мощных приводах для аэродинамических труб, был применен асинхронно-синхронный каскад, хотя и с участием машин постоянного тока.

Мощности двигателей постоянного тока для широкого регулирования скорости вращения также не превышают 6000 *квт* в одном якоре и, в случае надобности в больших мощностях, прибегают к двигательным агрегатам, представляющим собою механическое и электрическое соединение на одном валу нескольких таких двигателей.

Наконец нужно сказать о применении генераторов постоянного тока в качестве возбuditелей синхронных генераторов. Но и в этой области в последнее время намечается тенденция к их вытеснению при помощи сухих выпрямителей для небольших синхронных машин и при помощи ионных возбuditелей для крупных синхронных генераторов (турбогенераторов и гидрогенераторов).

Как явствует из приведенного обзора, машины постоянного тока, хотя и занимают в настоящее время в общей структуре промышленности и в проблеме электрификации страны относительно небольшое место, но благодаря своим регулирующим свойствам играют пока что важную роль в ряде областей промышленности и транспорта

## 27. Стандарты на эл. машины

По мере развития эл. машин и внедрения их в промышленность все настойчивее стала ощущаться потребность в издании таких правил и норм на эл. машины, на основании которых, с одной стороны, можно было бы сравнивать эл. машины разных заводов, с другой стороны, производить оценку эл. машин в отношении их надежности и экономичности.

В дооктябрьский период русская электротехническая промышленность была в зачаточном состоянии. Германия являлась тогда главным поставщиком привозных электротехнических изделий [Л 5]. Русские электротехники, объединившиеся с 1900 г. «Всероссийскими Электротехническими съездами» (ВЭС) и создавшие «Постоянный Комитет Всероссийских Электротехнических съездов» [Л 6], приняли на IV съезде (который состоялся в Киеве в 1907 г.) «Правила и нормы для эл. машин и трансформаторов», выработанные «Союзом Германских Электротехников», внося в них некоторые изменения. На последующих съездах, состоявшихся до первой мировой войны, в эти правила и нормы вносились изменения и дополнения. Последний в дооктябрьской России VII съезд состоялся в 1912 г. в Москве.

«Правила и нормы на эл. машины и трансформаторы», издававшиеся ВЭС, не имели обязательной юридической силы, но авторитет их был настолько высок и потребность в них была настолько велика, что как частновладельческие фирмы, так и правительственные учреждения неизменно опирались в своей практической работе на эти правила и нормы [Л. 7].

После Октябрьской революции Центральный Электротехнический Совет (ЦЭС), организованный при Главэлектро Высшего Совета Народного хозяйства (ВСНХ), принял на себя заботу об электротехнических правилах и нормах в широком смысле, а не только в части эл. машин и трансформаторов, причем были созваны в Москве два Всероссийских Электротехнических съезда: VIII Съезд, в 1921 г., и IX Съезд, в 1928 г. На последнем съезде было произведено разделение на «Правила и нормы на эл. машины» и «Правила и нормы на трансформаторы», причем как те, так и другие были коренным образом переработаны.

Правила и нормы на эл. машины IX ВЭС просуществовали в качестве одобренных ЦЭС до 1932 г., когда они были утверждены Всесоюзным комитетом по стандартизации при Совете Труда и Обороне как обязательные с пометкой, что несоблюдение их карается по закону. При утверждении (с 1.II 1932 г.) «Правила и нормы на эл. машины» были несколько видоизменены и разбиты на четыре стандарта:

ОСТ 3886. Электрические машины. Номенклатура и классификация. 1932.

ОСТ 3887. Электрические машины. Коэффициент полезного действия. Испытание машин. 1932 г.

ОСТ 3888. Электрические машины. Электрическая прочность и механические свойства. Испытание машин. 1932 г.

ОСТ 3889. Электрические машины. Нагрев электрических машин. Испытание машин. 1932 г.

Стандарты ОСТ 3887—3889 были значительно переработаны и изданы Народным Комиссариатом машиностроения СССР как основной стандарт на эл. машины, ОСТ 20020, обязательный с 1.III. 1939 г. Он вновь подвергся серьезной переработке в 1940 г. и был утвержден Всесоюзным Комитетом по стандартам при Совете Народных Комиссаров СССР как ГОСТ 183-41, обязательный с 25.II 1941 г. Здесь цифра «183» обозначает порядковый номер стандарта, а «41» — год его издания. Проект нового стандарта взамен ОСТ 3886. [ГОСТ 183-41] был опубликован в журнале «Электричество» за 1947 г., № 1, в 1948 г., № 7.

При изучении эл. машин постоянного тока ознакомление с основным стандартом на эл. машины, действующим в данное время, является совершенно необходимым.

Кроме основного стандарта на эл. машины, ГОСТ 183-41, Всесоюзным Комитетом по стандартам при Совете Народных Комиссаров (ныне Совете Министров) СССР выпущен ряд стандартов по отдельным типам эл. машин, их узлам и деталям и по электротехническим материалам. Имеется также ряд ведомственных технических условий и ведомственных нормалей на продукцию Министерства Электропромышленности СССР, перечень всех этих материалов см. в [Л 8].



## 28. Номинальные величины и поминальные режимы работы эл. машин

Всякая эл. машина снабжается небольшим заводским щитком, который прикрепляется к машине на видном и доступном для обозрения месте, обычно на ее станине, и на котором, кроме названия завода, изготовившего машину, типа машины по каталогу завода, заводского номера машины, года выпуска и стандарта, по которому она изготовлена, указываются основные технические данные машины. На заводских щитках машин постоянного тока указываются следующие данные: для какой работы она предназначена (генератор или двигатель), полезная мощность в *квт*, напряжение в *в*, ток в *а* и скорость вращения в *об/мин*, а в некоторых случаях и некоторые дополнительные величины. Все эти проставленные на заводском щитке технические данные носят название **номинальных величин** данной машины постоянного тока.

Если при этом на щитке нет указаний, для какого режима работы предназначена машина, то сообщаемые на ее щитке данные относятся к продолжительному номинальному режиму работы машины; при этих данных машина может работать непрерывно сколь угодно долго в пределах приемлемого срока службы машины, который ориентировочно считается в 12—15 лет.

Величина номинальной мощности машины при данной скорости вращения и данном напряжении определяется из условий допустимого нагрева отдельных частей ее при работе. Так как наименее стойкими в тепловом отношении являются изолирующие материалы, применяемые при изготовлении эл. машины, то допустимые при работе эл. машины превышения температуры отдельных частей ее над температурой окружающего воздуха, не превышающей  $+35^{\circ}\text{C}$ , определяются свойствами изолирующих материалов и стандартизованы в ГОСТ 183-41.

Кроме продолжительного номинального режима работы эл. машины, ГОСТ 183-41 предусматривает еще кратковременный номинальный режим работы и повторно-кратковременный номинальный режим работы, номинальные значения мощности для этих режимов работы машины определяются также из условий допустимых превышений температур для отдельных частей эл. машины, подробнее об этом будет сказано в главе, посвященной нагреванию машины (гл. XI).

Термин **номинальный** применяется и к ряду величин, не проставленных на заводском щитке, но связанных с номинальным режимом работы машины, например: номинальный к. п. д., номинальный вращающий момент, номинальный ток возбуждения и т. п.

## 29. Напряжения машин постоянного тока

Для стационарных (неподвижных) промышленных установок постоянного тока в СССР стандартизованы (ГОСТ 721-41) следующие напряжения для двигателей постоянного тока:

110 в, 220 в, 440 в.

Для покрытия падения напряжения в эл. сети генераторы постоянного тока должны давать напряжения несколько большие; для них стандартизованы напряжения:

115 в, 230 в, 460 в.

Для зарядки аккумуляторных батарей применяют генераторы постоянного тока на напряжения 115 и 230 в, допускающие регулировку, соответственно, до 160 и 320 в.

Напряжения для возбуждателей синхронных машин, а также для возбуждения генераторов постоянного тока с независимым возбуждением не стандар-

тизованы и выбираются наиболее подходящие по расчету возбуждаемой машины; встречаются как стандартные напряжения 115, 230 и 460 в, так и самые разнообразные, например, 45, 65, 144, 180, 375 в и т. п.

В прокатных установках постоянного тока для металлургических заводов применяются более высокие напряжения, что объясняется их большими мощностями. Эти напряжения не стандартизованы; применяются напряжения 550, 600, 750, 1000 в.

Для тяговых эл. двигателей постоянного тока применяются напряжения 550, 750, 1500 и 3000 в.

На морских судах применяются для машин постоянного тока те же напряжения, что и для промышленных установок; в авиации — напряжения 30 и 110 в постоянного тока.

### 30. Скорости вращения машин постоянного тока

Скорость вращения генератора постоянного тока определяется, при соединении его с поршневым первичным двигателем — паровым, гидравлическим, или внутреннего сгорания, — наиболее подходящей для заданной мощности скоростью вращения первичного двигателя. В связи с вытеснением генератора постоянного тока генератором переменного тока из области широкого промышленного генерирования эл. энергии в настоящее время такие установки встречаются крайне редко. Теперь обычно генератор постоянного тока применяется в качестве составной части агрегата, называемого двигателем-генератором, где двигателем является двигатель переменного тока. При стандартной частоте  $f = 50$  гц скорость вращения двигателя переменного тока  $n$  (в об/мин) определяется числом его полюсов по формуле:  $n = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{p} = \frac{3000}{p}$ , где  $p$  — число пар полюсов.<sup>1</sup> Так как генератор постоянного тока — машина, по существу своему, тихоходная, то в зависимости от его мощности приводной двигатель переменного тока берется с таким числом полюсов, чтобы получалась для генератора постоянного тока приемлемая скорость вращения. При  $p = 1, 2, 3, 4, 5$  и т. д. получаем по вышеприведенной формуле следующие возможные скорости вращения двигателя переменного тока:  $n = 3000; 1500, 1000, 750, 600$  об/мин и т. д. Например, для генератора постоянного тока на 6000 квт, 500 в приемлемой скоростью вращения является 500 об/мин, а потому приводной двигатель переменного тока берут с 12 полюсами ( $p = 6$ ).

Небольшие по мощности (от 0,5 квт до 60 квт) двигатели постоянного тока строят, исходя из подходящих для них окружных скоростей якоря, которые лежат в пределах 12—35 м/сек, а так как с возрастанием мощности двигателя требуется увеличение диаметра якоря, то скорости вращения вышеуказанных двигателей с возрастанием мощности падают. Каталожные типы небольших двигателей постоянного тока имеют следующий диапазон скоростей вращения: при мощности в 0,5 квт — около 1500 об/мин, при мощности 10 квт — около 1000 об/мин. Двигатели постоянного тока большей мощности соединяются непосредственно с приводимыми ими механизмами, которые и определяют их скорости вращения.

### 31. Понятие о современной машине постоянного тока

Во втором десятилетии XX века произошло окончательное осознание того, что добавочные полюсы в машинах постоянного тока представляют собой не только средство для обеспечения безискровой работы коллектора при неизменном положении щеток на коллекторе, но и средство, которое позволяет

<sup>1</sup> Число полюсов всегда четное и обозначается через  $2p$ .



строить машины постоянного тока с использованием активных материалов по предельным допускаемым превышениям температур при обеспечении сохранности машины в течение приемлемого срока ее службы. До этого предельная мощность машины при определенных основных размерах — габаритах — ограничивалась в большинстве случаев условиями безискровой работы коллектора.

Добавочные полюсы, изобретенные в середине 80-х годов прошлого столетия и принявшие технические формы в середине 90-х г., применялись до середины первого десятилетия 900-х годов лишь в тех случаях, когда без них «машина не выходила». В таких случаях на них смотрели как на неизбежное зло, так как полагали, что добавочные полюсы удорожают машину постоянного тока на 7—10% и ухудшают условия ее охлаждения.

Указанная выше переоценка роли добавочных полюсов могла произойти лишь при применении в машине постоянного тока одновременно с ними и вентиляторов. Последние позволили дополнительно поднять использование материалов настолько, что стали окупаться расходы материалов на устройство как добавочных полюсов, так и вентилятора. При этом к. п. д. машины, при повышенной в данных габаритах мощности, не понижается, что объясняется относительным снижением суммарных потерь машины с ростом ее мощности.

Таким образом, под современной промышленной машиной постоянного тока малой и средней мощности (начиная с 0,5 кВт и выше) понимается машина, неотъемлемыми деталями которой являются добавочные полюсы и встроенный вентилятор.

В тихоходных больших машинах постоянного тока, когда из-за небольших окружных скоростей якоря встроенный вентилятор получается недостаточно эффективным, прибегают к принудительной вентиляции от независимого вентилятора. При достаточных скоростях вращения, когда самовентиляция обеспечивает необходимое охлаждение, машины строят с естественным самоохлаждением.

В машинах постоянного тока, предназначенных для особо тяжелых режимов работы (например, 2—4-кратные быстро исчезающие перегрузки, т. е. увеличение мощности против той, на которую машина рассчитана), применяется, кроме добавочных полюсов, еще компенсационная обмотка как средство для предупреждения искажения магнитного поля машины при нагрузке. Компенсационная обмотка — сверстница по времени изобретения добавочным полюсам, — середина 80-х годов прошлого столетия, — была предложена первоначально как средство для улучшения коммутации.

Наконец нужно отметить еще, что в современной машине постоянного тока применяются, как правило, угольные щетки разных марок. Медно-угольные щетки, предшественники угольных щеток, ныне используются только в машинах постоянного тока низкого напряжения. Угольные щетки, впервые примененные в 90-х годах прошлого столетия, как-то незаметно, без особых дискуссий, приобрели всеобщее признание. Без соответствующих сортов угольных щеток построение современных крупных машин постоянного тока было бы немыслимо. Однако выбор для данной машины наиболее подходящего сорта угольной щетки для безискровой работы до сих пор производится в большинстве случаев эмпирически, по чутью, хотя и существуют некоторые общие правила. Проблема щеток пока не получила надлежащего разрешения. Это наиболее темное место в теории машин постоянного тока, которое в большинстве случаев обходят молчанием, полагаясь на практику.

## 32. О теории современных машин постоянного тока

Приступая к изучению теории современных машин постоянного тока, полезно составить себе общее представление о совокупности входящих в нее проблем и их взаимной связи, чему и посвящен этот параграф.

Изложение теории машин постоянного тока в этой книге ведется в расчете на читателя, имеющего познания в области теоретических основ электротехники в объеме курса:

П. Л. К а л а н т а р о в, Л. Р. Н е й м а н, Теоретические основы электротехники, ГЭИ, 1951 г

Ценное дополнение и углубление познаний в области электромагнитных и электрических явлений читатель найдет в книгах

В. Ф. М и т к е в и ч, Магнитный поток и его преобразования. Изд. АН СССР, 1946,

И. Е. Т а м м, Основы теории электричества, ОГИЗ, Техиздат, 1949, 4-е издание

Отсылая к этим книгам, автор при изложении отдельных вопросов будет все же попутно вкратце напоминать те законы, которые в конкретном случае имеют особо существенное значение

Генераторное действие машины постоянного тока покоится на открытом Фарадеем законе электромагнитной индукции. Энергетическая обратимость машины постоянного тока, т. е. способность ее работать как генератором, так и двигателем, вытекает из закона, открытого Ленцем. Для объяснения и подсчетов двигательного действия машины постоянного тока служит закон Био-Савара.

Закон Фарадея определяет величину и направление э. д. с., возникающей в проводнике, который движется в магнитном поле, причем для определения направления э. д. с. имеется, кроме фарадеевского правила пловца, ряд позднейших мнемонических правил. Закон Био-Савара дает величину и направление механической силы, действующей на проводник с током, находящийся в магнитном поле. Для быстрого определения направления этой силы также имеется ряд мнемонических правил

Когда проводник с током приходит в движение под воздействием указанной механической силы, то в нем, согласно закону Фарадея, возникает э. д. с., которая будет иметь направление, обратное тому, которое имеет э. д. с., создающая ток, пропускаемый по проводнику. По этой причине э. д. с., возникающую в проводнике с током, движущемся в магнитном поле под влиянием возникающей механической силы, называют обратной э. д. с. (обратная току).

И в генераторе и в двигателе постоянного тока мы имеем, таким образом, ~~дело~~ с основной электромашиной обмоткой, состоящей из ряда проводников, соединенных по особым правилам, и называемой якорной (рабочей) обмоткой, и с основным индуктирующим магнитным полем, создаваемым индукторной (нерабочей) обмоткой, называемой также возбуждающей, или намагничивающей обмоткой

Соответственно указанным двум главным частям машины постоянного ~~тока~~ в теории этих машин, излагаемой в данной книге, имеются главы, посвященные «главной магнитной цепи» (гл. II) и «главной электрической цепи» (гл. III—IV). В этих главах машина постоянного тока рассматривается при ее ~~нормальном~~ ~~нормальном~~ ходе и номинальной скорости вращения.

Эти главы расположены непосредственно после гл. I, в которой даются общие сведения о современных машинах постоянного тока и их конструктивном выполнении, что необходимо для конкретности изложения последующих глав.

В гл. V излагаются основные явления, связанные с нагрузкой машины постоянного тока, а именно: с реакцией якоря и с коммутацией тока.

После выяснения физической сущности этих явлений излагаются в этой ~~главе~~ ~~главе~~ и современные средства борьбы с теми отрицательными явлениями, которые возникают при нагрузке. Эти средства: добавочные полюсы, применяемые для улучшения коммутации тока, и компенсационная обмотка, применяемая для борьбы с реакцией якоря в машинах, предназначенных для особо тяжелых условий работы (многократные и быстро меняющиеся нагрузки,

значительно, в 2—4 раза превосходящие номинальную, — преходящие перегрузки).

После этих глав следует гл. VI, посвященная более обстоятельному рассмотрению теории коммутации тока, наиболее сложной проблеме в теории машин постоянного тока, до сих пор не получившей своего теоретического завершения, хотя практически все вопросы, связанные с коммутацией тока, получили надлежащее разрешение.

Главы II—VI являются центральными в теории машин постоянного тока. На базе их рассматриваются свойства генераторов — гл. VII, свойства двигателей — гл. VIII, совместная работа машин постоянного тока — гл. IX.

При работе машины постоянного тока, как и всякой машины, происходят потери энергии, они рассматриваются в гл. X.

Потери энергии, в конечном счете, переходят в теплоту, вследствие чего происходит повышение температуры отдельных частей машины над температурой окружающей среды. Предел допустимому превышению температур ставят изолирующие материалы, применяемые при изготовлении обмоток машины. Для того чтобы эффективнее использовать в машине дорогостоящие активные материалы (медь, электротехническая сталь) и изоляцию, применяют форсированное охлаждение машин при помощи вентиляторов. Указанные вопросы выходят из круга электрических и магнитных явлений, но прогресс построения машин делает их особо важными, и в настоящее время они являются такими же равноправными, как и прочие. По меткому выражению одного из авторов, в эл. машине мы имеем четыре потока, которые необходимо учитывать: электрический, магнитный, тепловой и воздушный. Исчерпывающее изложение их, в особенности вопросов вентиляции, приходится выделять в особые книги, но основные понятия применительно к машинам постоянного тока должны найти место и в данной книге. Этим вопросам посвящены гл. XI — нагревание и охлаждение машин постоянного тока, и гл. XII — вентиляция машин постоянного тока.

Этим исчерпываются вопросы теории машин постоянного тока при установившемся режиме их работы.

В последние годы, в связи с применением машин постоянного тока в прокатных установках и, частично, в эл. тяге, особое значение приобрели так называемые переходные процессы в них. Рассмотрение этих процессов, однако, целесообразно вести с использованием выводов из теории переходных процессов в синхронных машинах, где они подверглись весьма обстоятельной разработке и привели к установлению ряда новых понятий (переходных значений параметров машин и их постоянных времени). Поэтому в данной книге переходные процессы в машинах постоянного тока рассматриваются лишь в ограниченном объеме в некоторых главах, главным образом, при рассмотрении пуска в ход и при исследовании процесса возбуждения машин постоянного тока.

## Б. КОНСТРУКТИВНОЕ ВЫПОЛНЕНИЕ ГЛАВНЕЙШИХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 33. Общие замечания

Конструкция эл. машин и расчеты на прочность их деталей излагаются обычно во втузах тогда, когда теория основных типов эл. машин уже изучена. Это позволяет рассматривать объединенно ряд конструктивных вопросов и деталей, общих всем эл. машинам, чем облегчается задача изложения конструкции эл. машин. Однако, приступая к изучению того или иного раздела теории эл. машин, в частности, к изучению машин постоянного тока, необходимо стремиться к тому, чтобы у изучающего было вполне конкретное представление о конструктивном выполнении машины постоянного тока в целом и наиболее характерных ее деталей. В противном случае изучение теории машин постоянного тока было бы оторванным от жизни и трудно усвояемым.

Поэтому мы считаем необходимым, кроме общего описания машин постоянного тока, данного в § 21, предпослать изложению теории машин постоянного тока раздел, посвященный более обстоятельному ознакомлению с главнейшими деталями машин постоянного тока, не касаясь вопросов расчета их на прочность. Это необходимо еще и потому, что студенты других специальностей электротехнических вузов, кроме электромеханической, совсем не изучают специального курса конструкции эл. машин.

Желающих углубить свои познания по конструкции машин постоянного тока и по расчетам их деталей на прочность мы отсылаем к соответствующим курсам [Л. 9].

При изготовлении эл. машин применяется, кроме обычных конструкционных материалов (железа, стали, чугуна, меди, бронзы), еще ряд специальных электротехнических материалов: проводниковые (электролитическая медь), ферромагнитные (листовая электротехническая сталь), разнообразные изоляционные материалы, материалы большого сопротивления (для изготовления реостатов).

Изучение свойств электротехнических материалов происходит одновременно с изучением теории машин постоянного тока. Поэтому мы можем считать эти свойства известными и ограничиться лишь простым изложением в соответствующих местах тех свойств электротехнических материалов, которые необходимо учитывать при изучении теории машин постоянного тока.

Электротехническим материалам посвящен ряд книг [Л. 10].

### 34. Примеры выполненных машин постоянного тока

В дополнение к фиг. 13 и 14 (§ 21) приводятся разрезы, — продольный (по оси машины) и поперечный (перпендикулярно к оси машины через ее середину), — а также фотографии нескольких других машин завода «Электросила» разных мощностей и скоростей вращения для иллюстрации современных машин постоянного тока.

Описание конструктивных выполнений главнейших деталей дано в нижеследующих параграфах.

Приведенные примеры выполненных машин постоянного тока (см. фиг. 13, 14, 25—29) относятся к машинам, применяемым в промышленности. Машины постоянного тока, предназначенные для электрической тяги (тяговые эл. двигатели), для морских судов (морские эл. машины), для авиации (самолетные эл. машины) и некоторых других отраслей, имеют ряд характерных конструктивных особенностей, которые излагаются в соответствующих специальных курсах эл. машин, а потому здесь не рассматриваются.

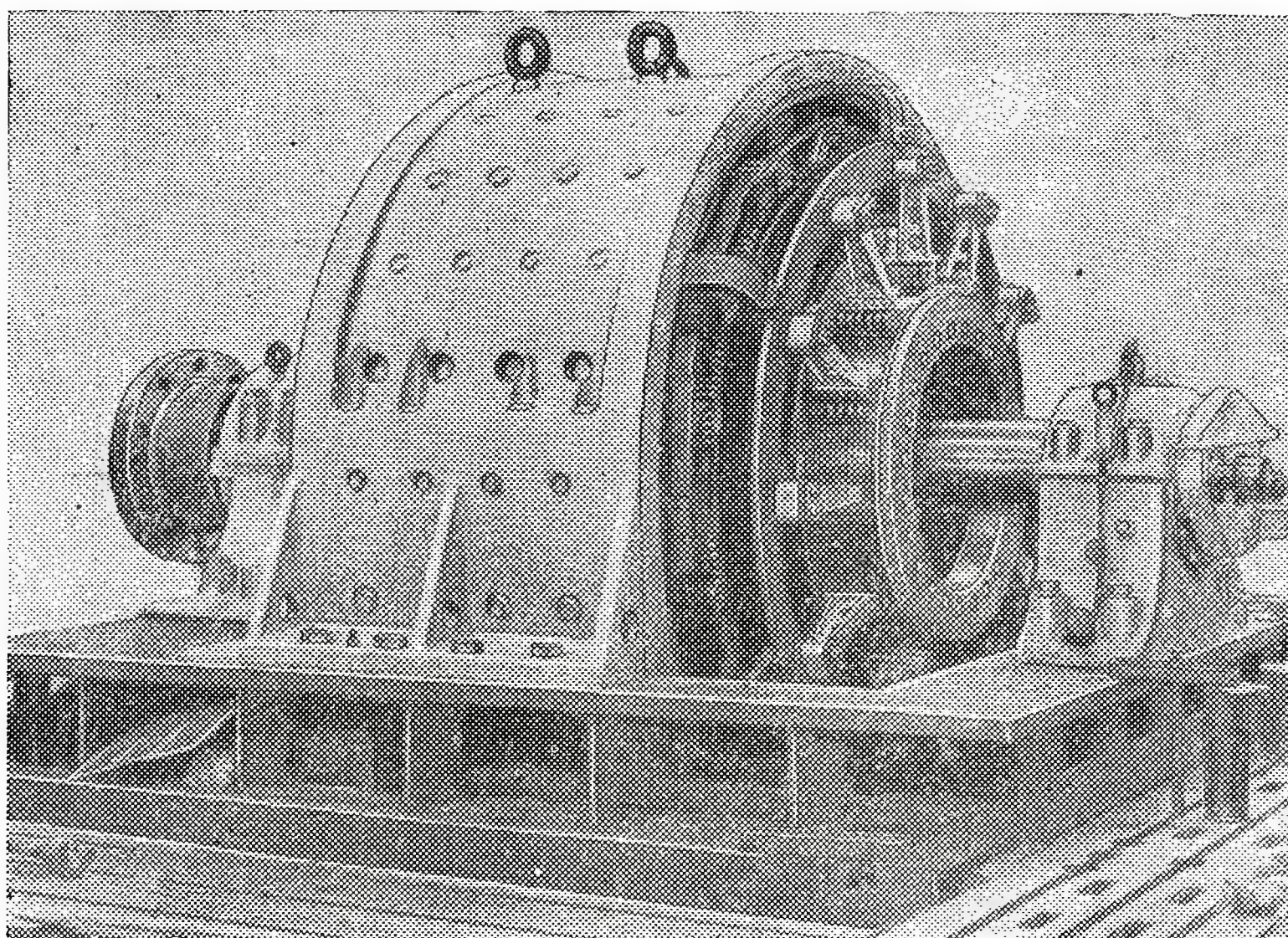
### 35. Якорь <sup>1</sup>

Диски якоря штампуются из особой тонкой листовой стали толщиной, как правило,  $\Delta = 0,5$  мм, называемой электротехнической сталью. Она содержит от 0,8 до 2,0% кремния (силиция, Si). Присадка кремния до 2,0% имеет целью уменьшить потери в стали, а также предохранить сталь от старения, т. е. от увеличения со временем потерь. На кривой намагничивания электротехнической стали указанная присадка кремния практически мало сказывается. Примеси других химических элементов — углерода (C), серы (S), фосфора (P) должны быть минимально возможными при ее производстве.

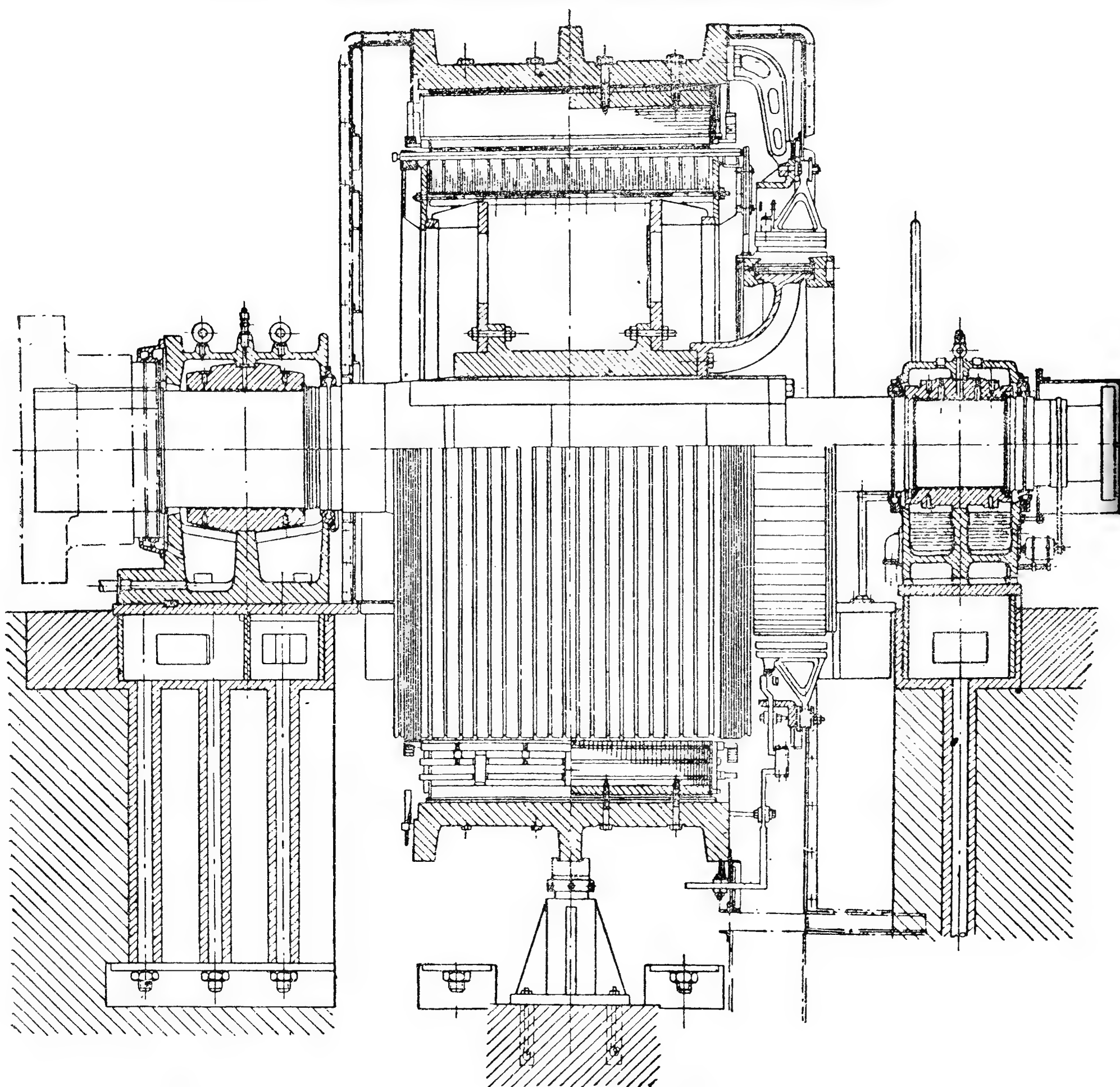
Характеристики марки Э12 стали, применяемой обычно при изготовлении машин постоянного тока, приведены в табл. 2, здесь же приведены характеристики марки Э31, имеющей присадку кремния до 3%,

<sup>1</sup> См. сказанное об якоре в § 21



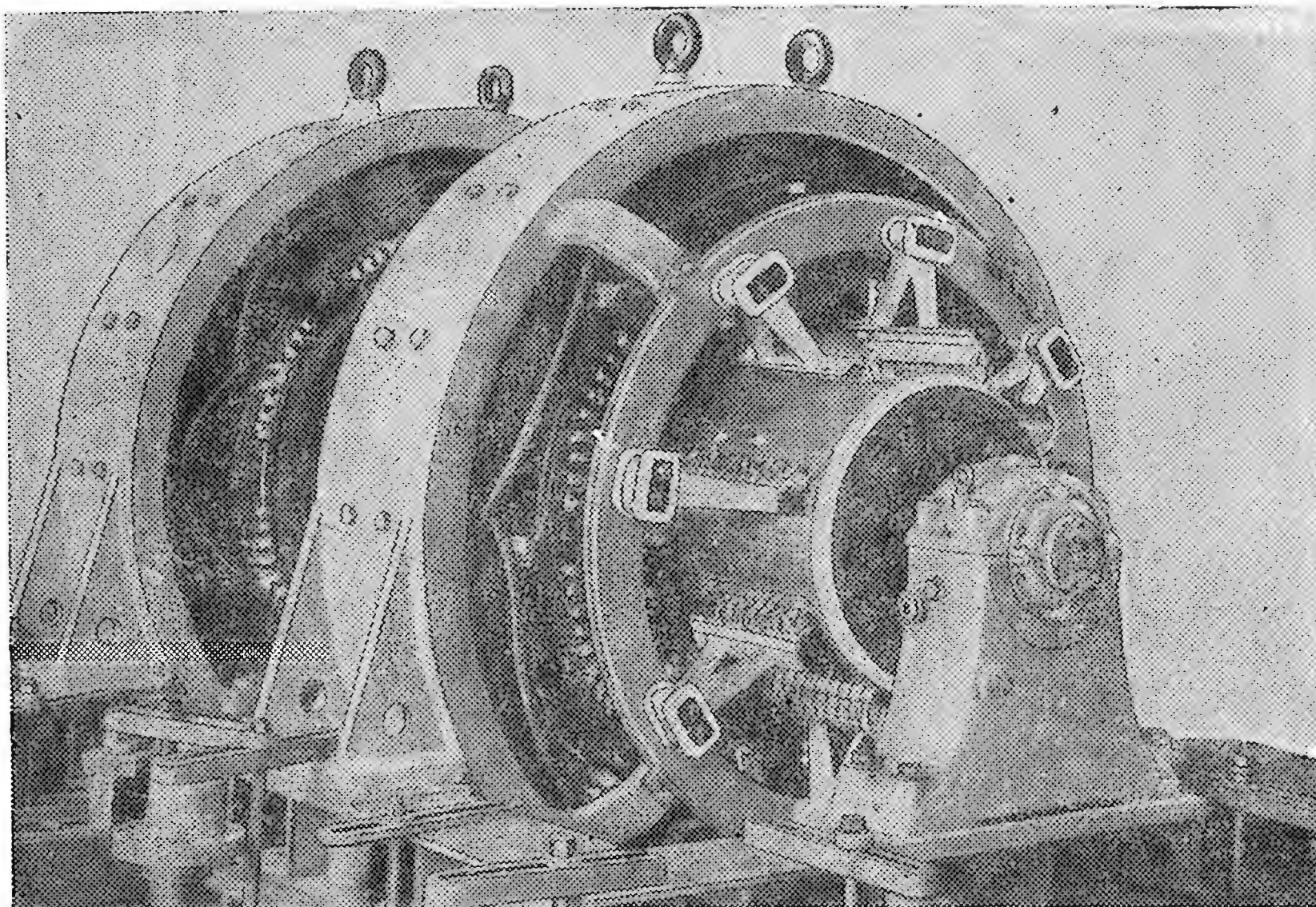


Фиг. 25. Машина постоянного тока типа МП 2500-80.

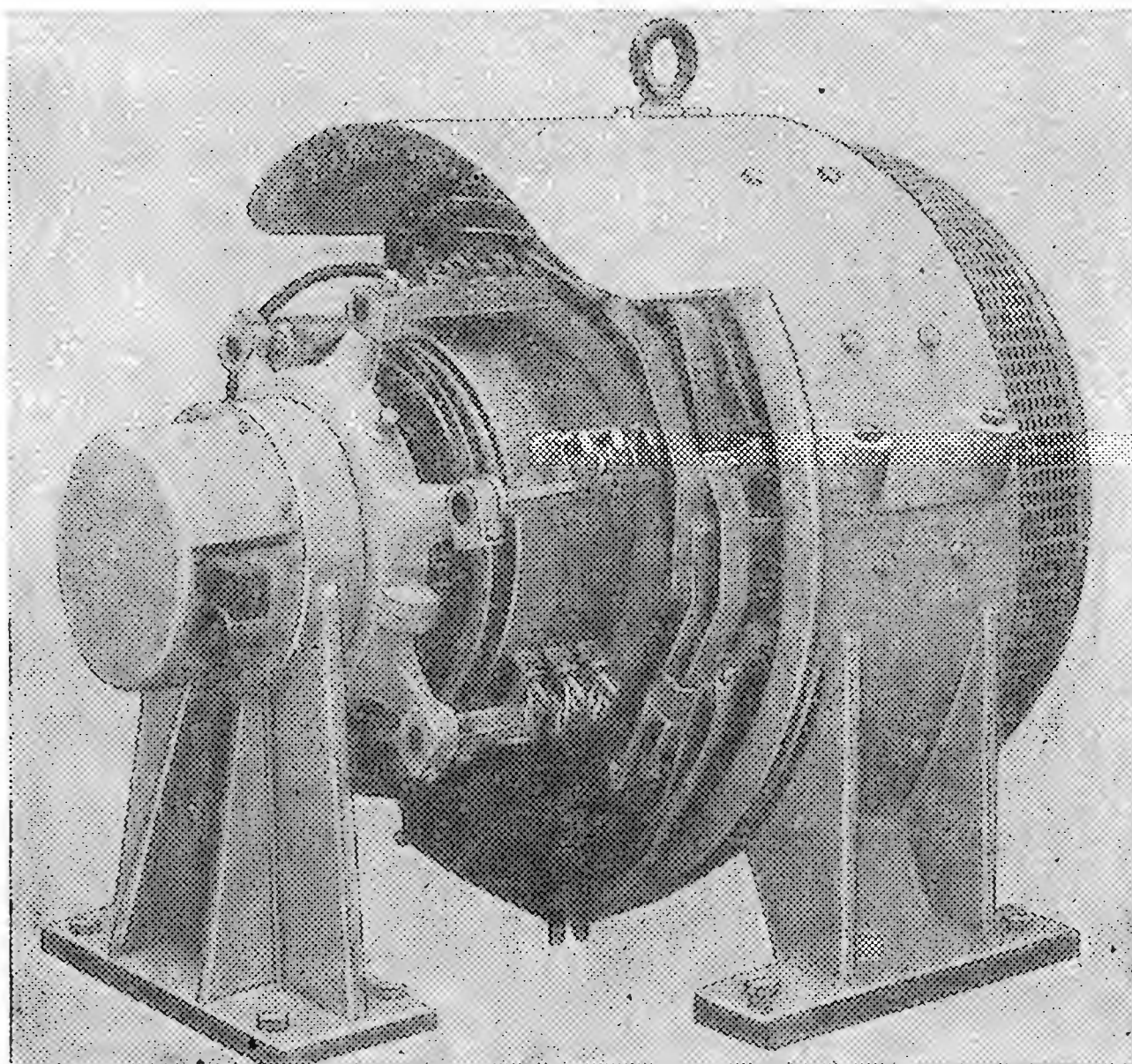


Фиг. 26. Продольный разрез машины постоянного тока типа МП 5000-37,5.



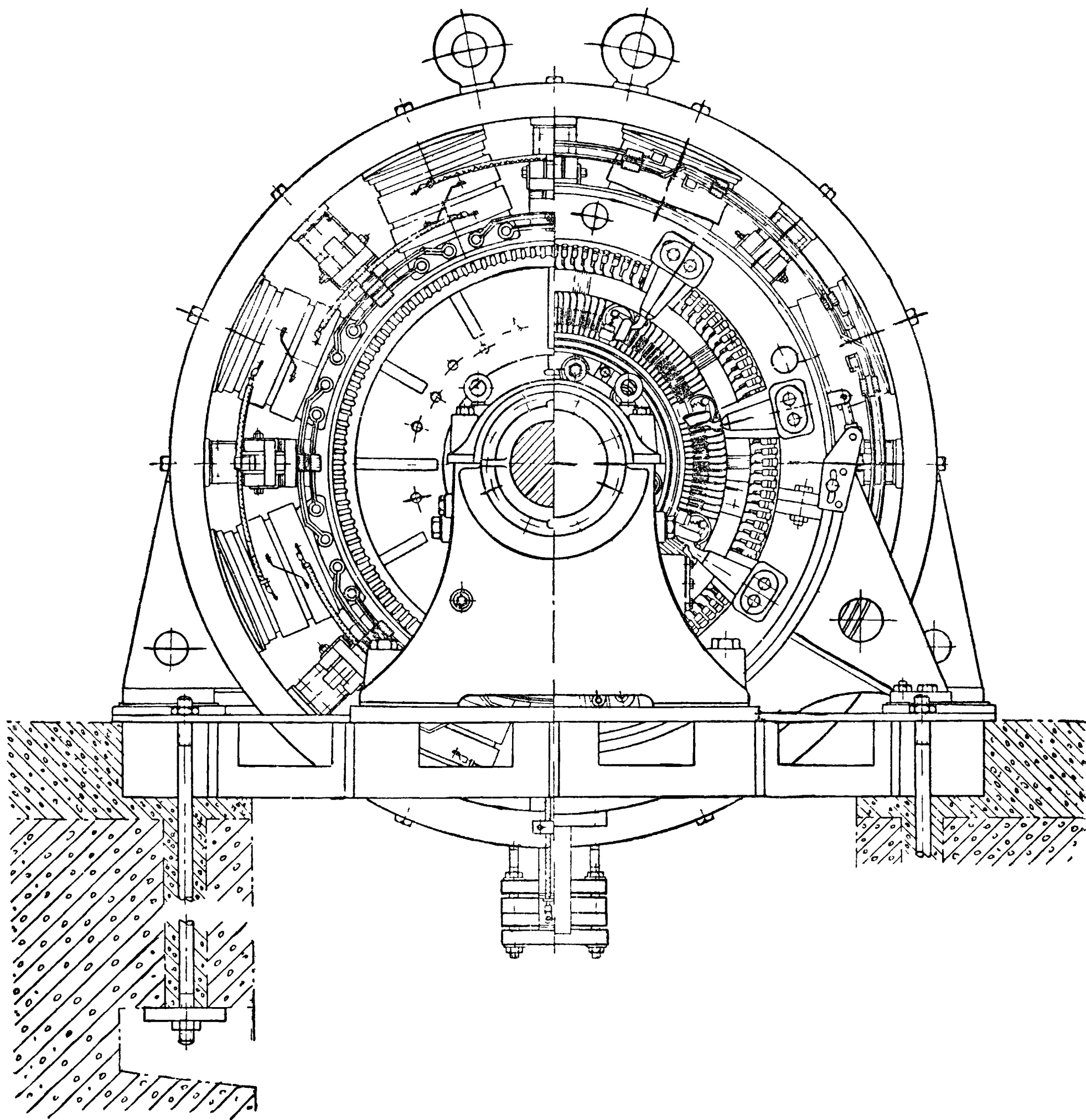


Фиг. 27. Две машины постоянного тока типа МП-2100.



Фиг. 28. Генератор постоянного тока мощностью  
в 200 квт, 230 в, 1000 об/мин.

вследствие чего она имеет меньшие удельные потери при стандартных условиях, указанных в табл. 2, но обладает худшей кривой намагничения. Эту марку применяют редко, лишь для крупных двигателей постоянного тока с большим числом полюсов, или быстроходных.

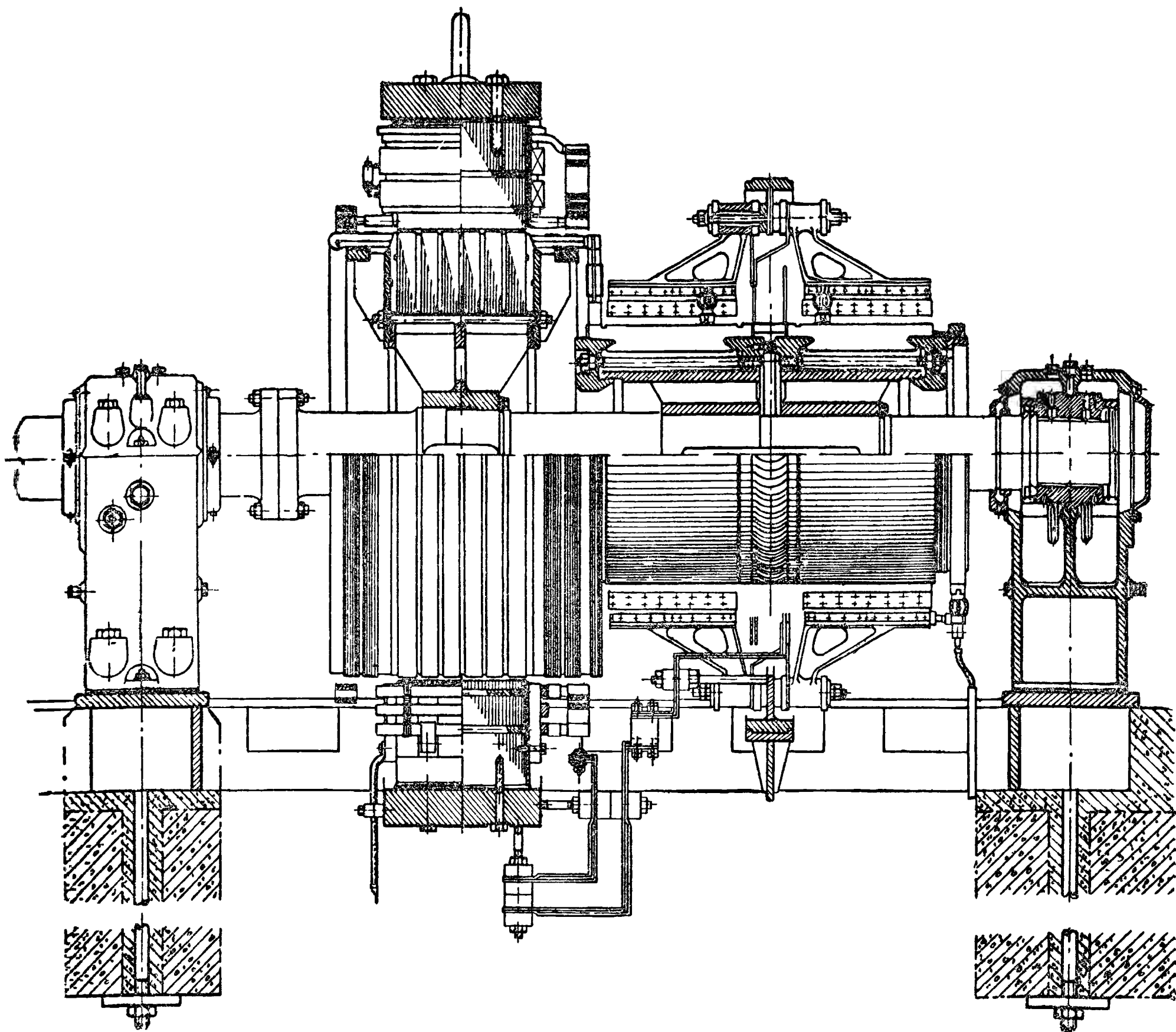


Фиг. 29а. Поперечный разрез машины постоянного тока типа ГП 1000-750.

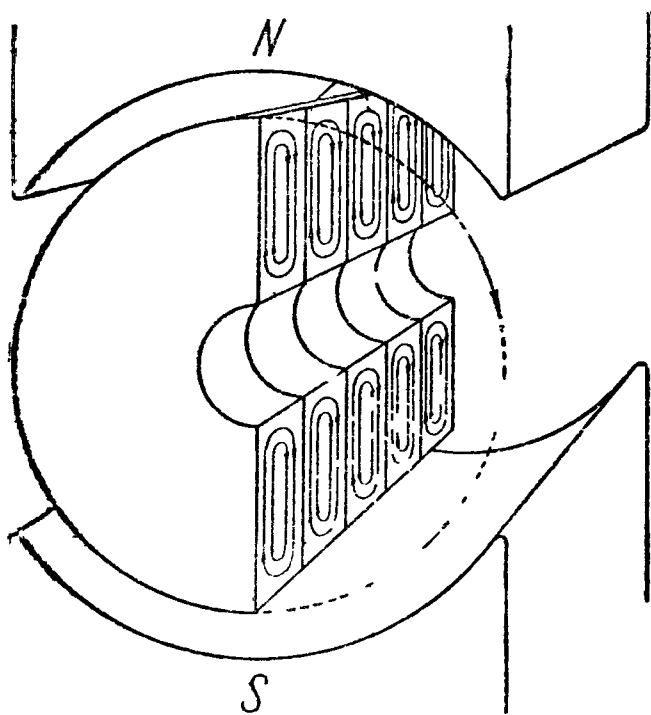
Расслоение якоря на диски, перпендикулярные к оси машины, делается для уменьшения потерь на вихревые токи. Направление этих токов, определяемое по правилам индукции, показано на фиг. 30. Диски изолируют друг от друга либо оклейкой с одной стороны каждого листа тонкой бумагой, толщиной 0,02—0,03 мм, либо двусторонним покрытием листов тонким слоем специального изолирующего лака.

В последнее время на заводах «Динамо» им. С. М. Кирова и «ХЭМЗ» (Харьковский электромеханический завод) им. И. В. Сталина была опробована оксидация листовая электротехнической стали путем создания на поверхности листов непроводящей тонкой пленки окисла железа при нагревании в окислительной атмосфере [Л. 11]. Опыты привели к положительным результатам: пленка получается равномерной, прочной, со значительным эл. сопротивлением и меньшей толщины, чем лаковая при лакировке железа. Это

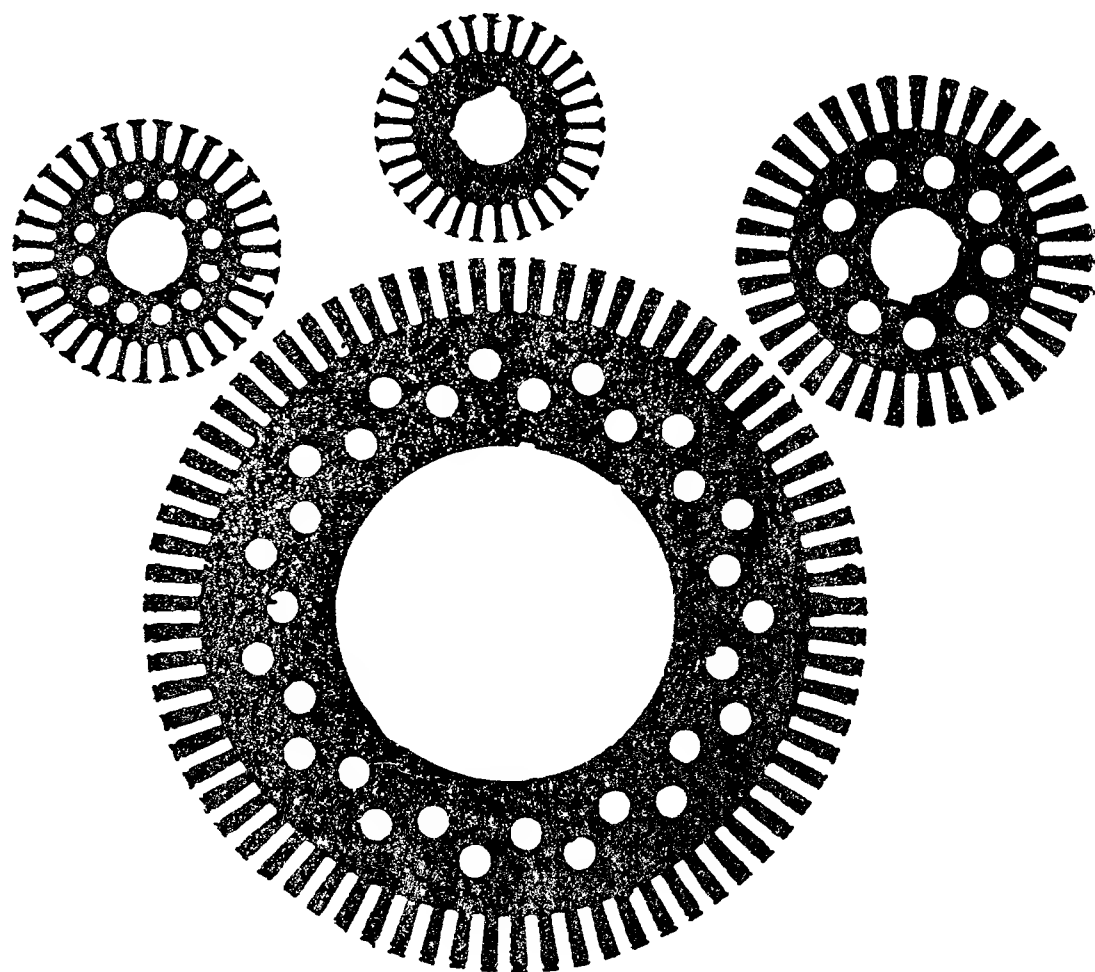




Фиг 296. Продольный разрез машины постоянного тока типа ГП 1000-750.



См. 30. Пути распространения вихревых токов в железе якоря машины постоянного тока.



Фиг. 31. Диски якорного железа.

Таблица 2

Характеристики листовой электротехнической стали, применяемой для электрических машин (из ГОСТ 802-54)

Размеры листа, мм	Марка стали							
	Э11		Э12	Э31		Э41	Э42	
	Толщина листа, мм							
	1,0	0,5	0,5	0,35	0,5	0,5	0,35	0,5
Вес в килограммах								
750×1500	8,78	4,39	4,39	3,1	4,3	4,25	2,97	4,25
1000×2000	—	7,8	7,8	—	7,65	7,55	—	7,55
860×1720	—	5,77	5,77	—	5,65	5,58	—	5,58
600×1200	—	2,81	2,81	—	—	—	—	—
Марки стали	Номиналь- ная тол- щина листа, мм	Магнитная индукция в гауссах при напря- женности магнитного поля, ав/см					Удельные потери, вт/кг	
		B <sub>10</sub>	B <sub>25</sub>	B <sub>50</sub>	B <sub>100</sub>	B <sub>300</sub>	P 10/50	P 15/50
		Не менее					Не более	
Э11	1,0	—	15 000	16 200	17 500	19 700	5,80	13,4
Э11	0,5	—	15 000	16 200	17 500	19 700	3,30	7,90
Э12	0,5	—	14 900	16 100	17 400	19 600	2,80	6,80
Э31	0,5	—	14 600	15 700	17 000	19 000	2,00	4,50
Э31	0,35	—	14 600	15 700	17 000	19 000	1,60	3,60
Э41	0,5	13 000	14 500	15 600	16 800	18 800	1,60	3,60
Э42	0,5	12 900	14 400	15 500	16 700	18 700	1,40	3,20
Э42	0,35	12 900	14 400	15 500	16 700	18 700	1,20	2,80

Примечание. Буквы и цифры в марках электротехнической стали условно обозначают:  
Э — электротехническая сталь,  
Первая цифра (1, 2, 3; 4) — степень легирования стали кремнием:  
1 — слаболегированная сталь,  
2 — среднелегированная сталь,  
3 — повышенолегированная сталь,  
4 — высоколегированная сталь.  
Вторая цифра (1; 2) — гарантированные электромагнитные свойства стали.

позволяет увеличить коэффициент заполнения стали и уменьшить потери в стали. Способ имеет, повидимому, будущее.

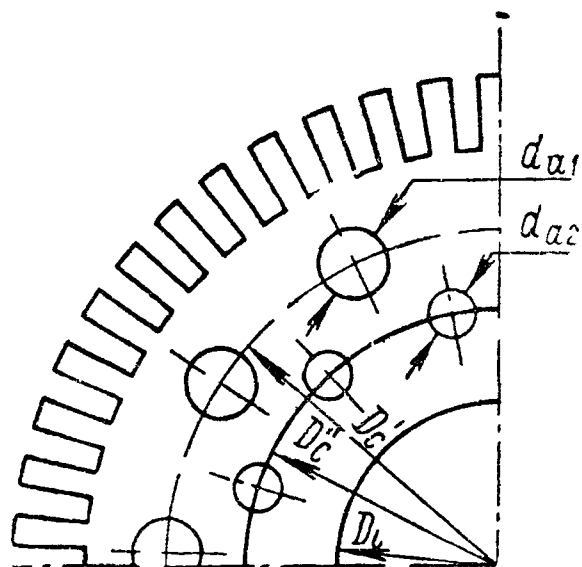
При применении в машине аксиальной вентиляции в дисках стали якоря имеются выштампованные круглые отверстия, которые при сборке якоря образуют вентиляционные каналы (фиг. 31—32).

В машинах с радиальной вентиляцией диски стали собираются в пакеты, имеющие толщину в 6—10 см (фиг. 33). Крайние листы пакетов делаются из листов толщиной Δ = 1,0 мм, к ним привариваются или приклепываются распорки, называемые ветреницами, так как они играют роль вентиляторных крылышек. Иногда распорки образуют из отогнутых надрезов в крайних листах пакетов. Распорки удерживают отдельные пакеты на расстоянии в 1 см, благодаря чему и образуются радиальные вентиляционные каналы.

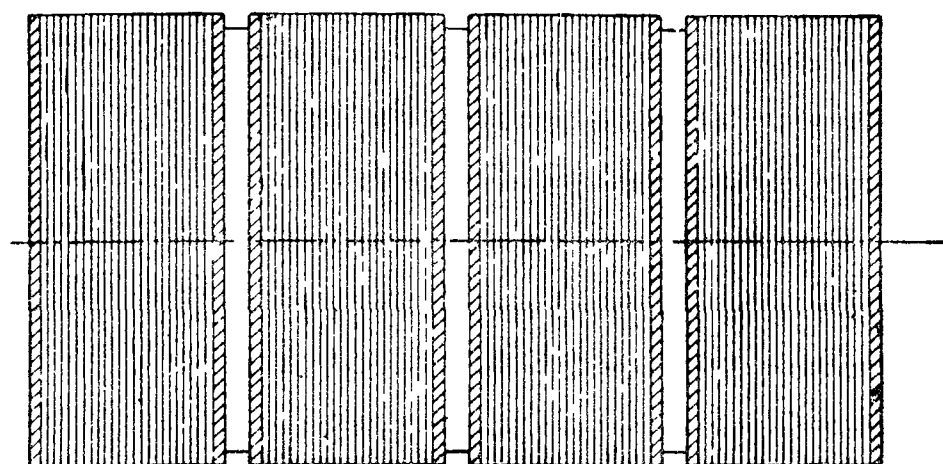
При диаметрах якоря D<sub>а</sub> < 15 см в нем не делают никаких вентиляционных каналов, и диски собирают на вал непосредственно, в один пакет



(фиг. 34). При  $D_a > 45$  см диски насаживают на ступицу, имеющую ряд выступов, которые придают ей звездообразный характер, такая ступица получила название **якорной звезды** (фиг. 35). При значительных размерах выступы якорной звезды принимают вид спиц махового колеса. В этом случае якорная звезда превращается в **якорное колесо**, называемое также **якорным остовом** (фиг. 36)



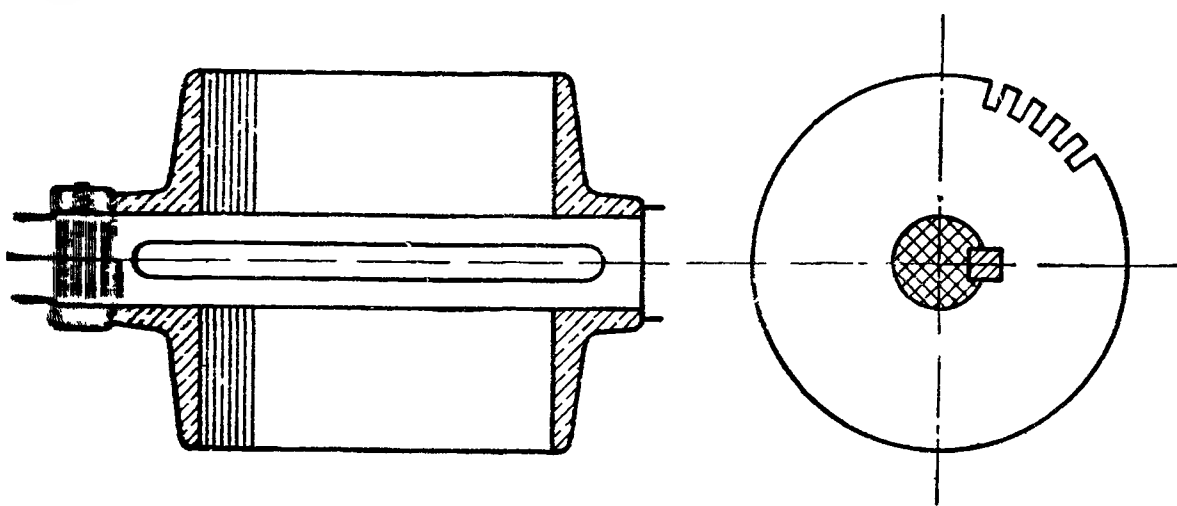
**Фиг. 32** Часть диска якорного железа с указанием некоторых размеров:  $D_i$  — диаметр вала,  $D_c''$  — диаметр окружности, на которой расположены центры отверстий диаметра  $d_{a2}$ ;  $D_c'$  — диаметр окружности центров отверстий с диаметром  $d_{a1}$ .



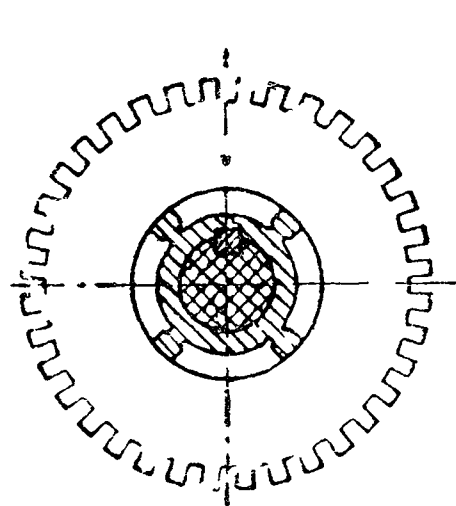
**Фиг. 33** Пакеты якоря с вентиляционными каналами между ними.

Чтобы при вращении воспрепятствовать сдвигу дисков в плоскости, перпендикулярной к валу, их укрепляют на валу или на ступице, или на **якорном** колесе посредством шпонки.

Так как нормальные листы электротехнической стали имеют размеры **1000 мм** на 1500 или на 2000 мм, то максимальный диаметр диска якоря не



**Фиг. 34.** Сборка дисков якоря непосредственно на валу

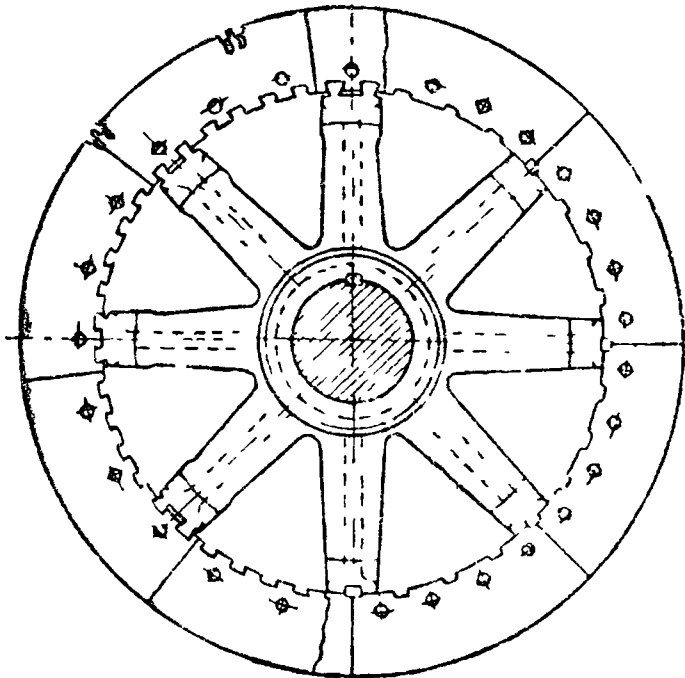


**Фиг. 35.** Насадка дисков якоря на ступицу.

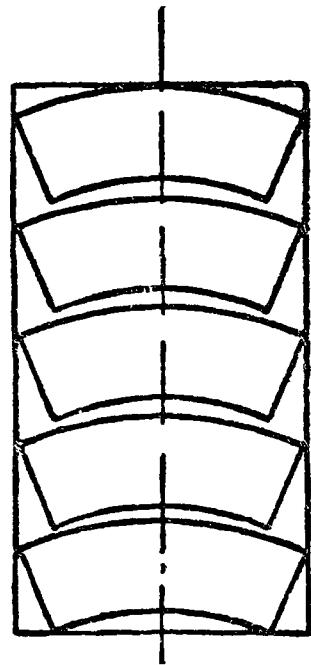
может быть более 990 мм, минимум 10 мм приходится резервировать на возможные дефекты по краям листа. По этой причине, если  $D_a > 990$  мм, то диски приходится делать составными из нескольких кольцевых сегментов. Хорда сегмента по верху берется с таким расчетом, чтобы при штамповке получалось возможно меньше отходов<sup>1</sup> (фиг. 37)

Отдельные сегменты двух смежных дисков укладывают так, чтобы происходило перекрытие стыков сегментов. Это необходимо как с целью предупреждения ухудшения магнитной проводимости якоря, так и для увеличения сопротивляемости центробежной силе при вращении якоря. Против центробежной силы сегменты удерживаются либо ласточкиными хвостами,

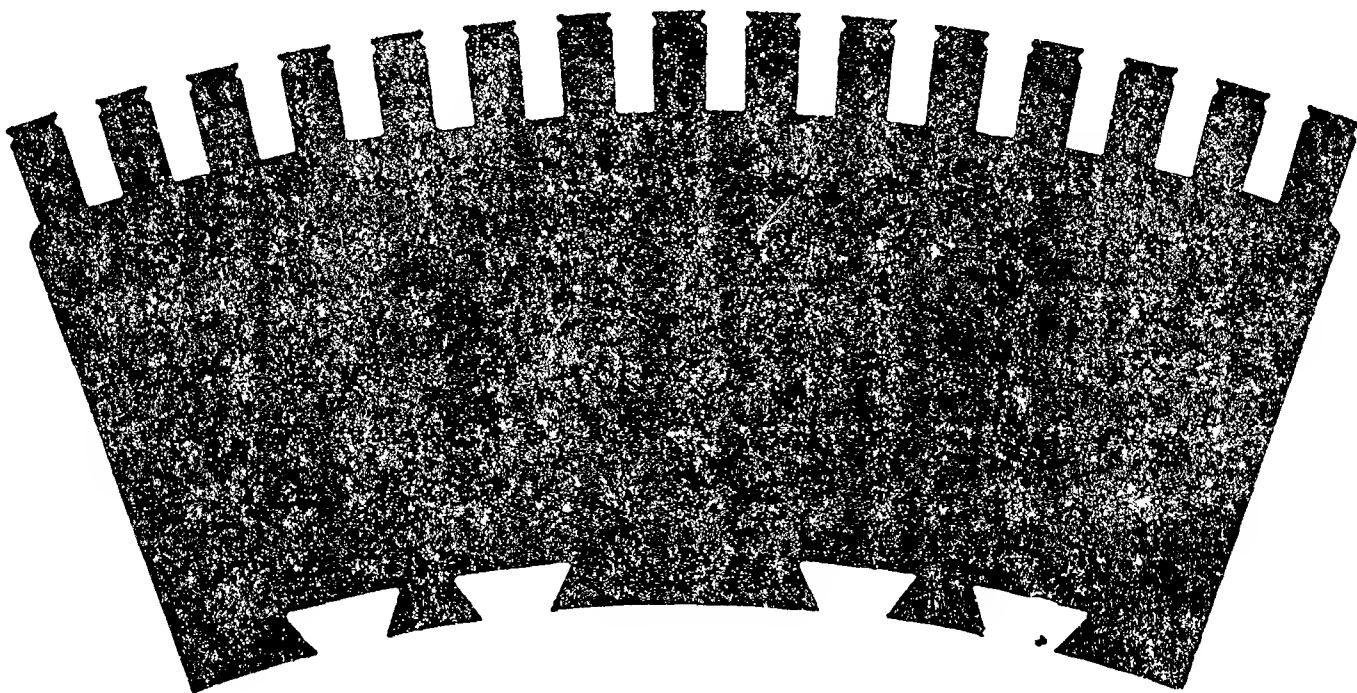
<sup>1</sup> Полезно отметить, что в трансформаторе сердечник собирается из прямоугольных листов, вследствие чего отходы электротехнической стали составляют всего 8—10%. В эл. машинах при штамповке дисков и сегментов отходы составляют до 30%.



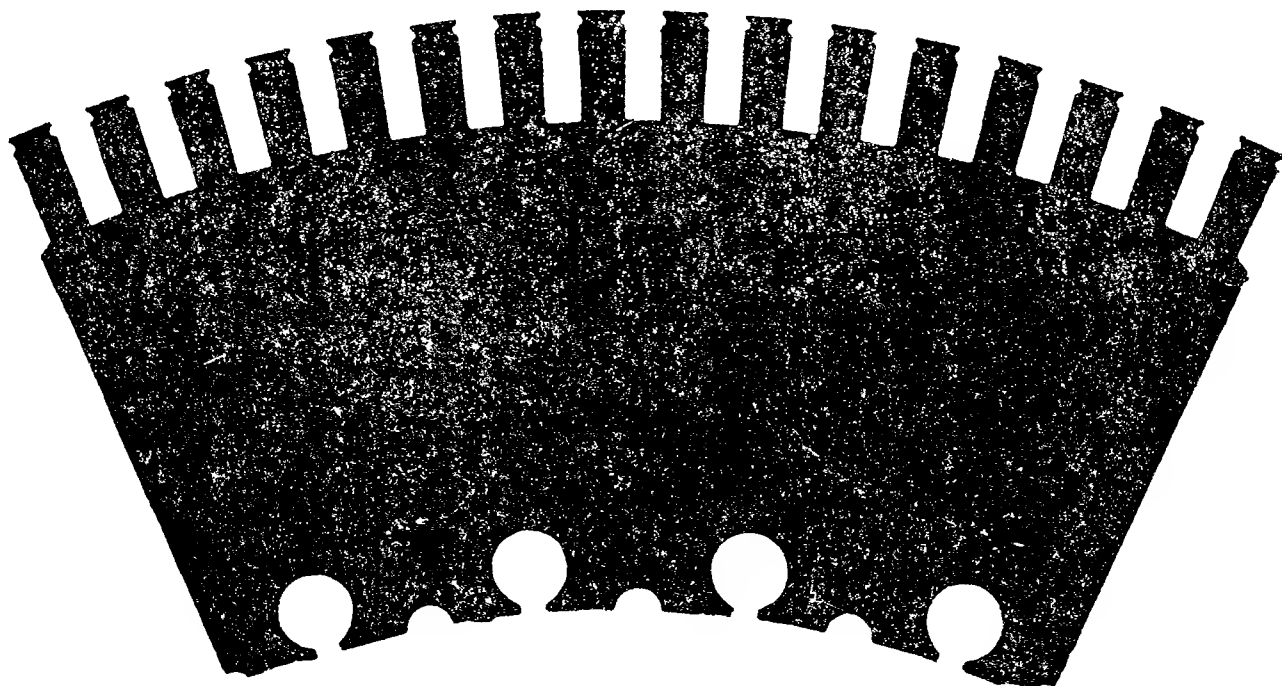
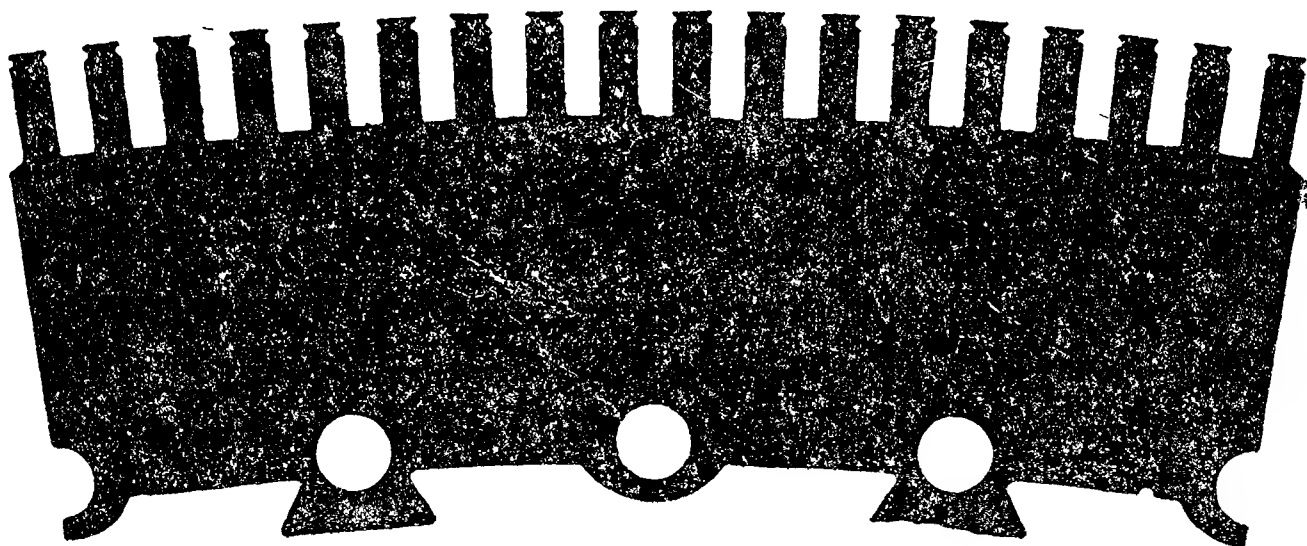
Фиг. 36. Насадка железа якоря на якорное колесо.



Фиг. 37. Штамповка кольцевых сегментов якоря из листа электротехнической стали.



Фиг 38 Кольцевой сегмент со штампованными пазами и ласточкиными хвостами.



Фиг 39 Кольцевые сегменты якоря со штампованными отверстиями под крепящие шпильки.

устроенными на внутренней дуге сегмента (фиг. 38), либо шпильками, пропускаемыми через отверстия, проштампованные по внутренней дуге сегмента (фиг. 39).

Собранные в пакеты тонкие диски якоря спрессовывают под давлением 6—10 кГ/см<sup>2</sup> между нажимными дисками соответствующей толщины, которые удерживают якорь в стянутом состоянии особым креплением на валу (фиг. 34), либо на ободке якорной звезды (фиг. 35), либо якорного колеса (фиг. 36). Стяжные шпильки изолируют от дисков якоря посредством гильз из пресс-шпана, чтобы воспрепятствовать образованию проводящих замкнутых контуров. Вблизи от внешней окружности якоря проштамповывают впадины, или пазы, в которых укладывается обмотка якоря; вследствие этого якорь получает зубчатое очертание и носит название **зубчатого барабанного якоря**, в отличие от ранее применявшегося **гладкого барабанного якоря** (без зубцов).

### 36. Пазы якоря

На фиг. 40 показаны наиболее употребительные формы пазов якоря. В машинах, проводники якорной обмотки которых имеют прямоугольное сечение, пазы делают с параллельными стенками, вследствие чего зубцы якоря получают сужающуюся к центру якоря коническую форму (фиг. 40, а, в—м). При изготовлении обмотки якоря из круглых проводников возможно устройство якорных пазов, сужающихся к центру якоря таким образом, чтобы стенки зубцов были параллельными (фиг. 40, б). Эта возможность используется обычно в машинах с небольшим внешним диаметром якоря  $D_a$  для избежания чересчур тонких у основания зубцов, что не только ослабило бы их механически, но и привело бы к непомерно большим индукциям в этих частях зубцов.

Пазы с параллельными стенками имеют обычно плоское дно, однако при применении для якорной обмотки круглых проводников возможно устройство дна пазов с закруглением, что иногда и используется (фиг. 40, а).

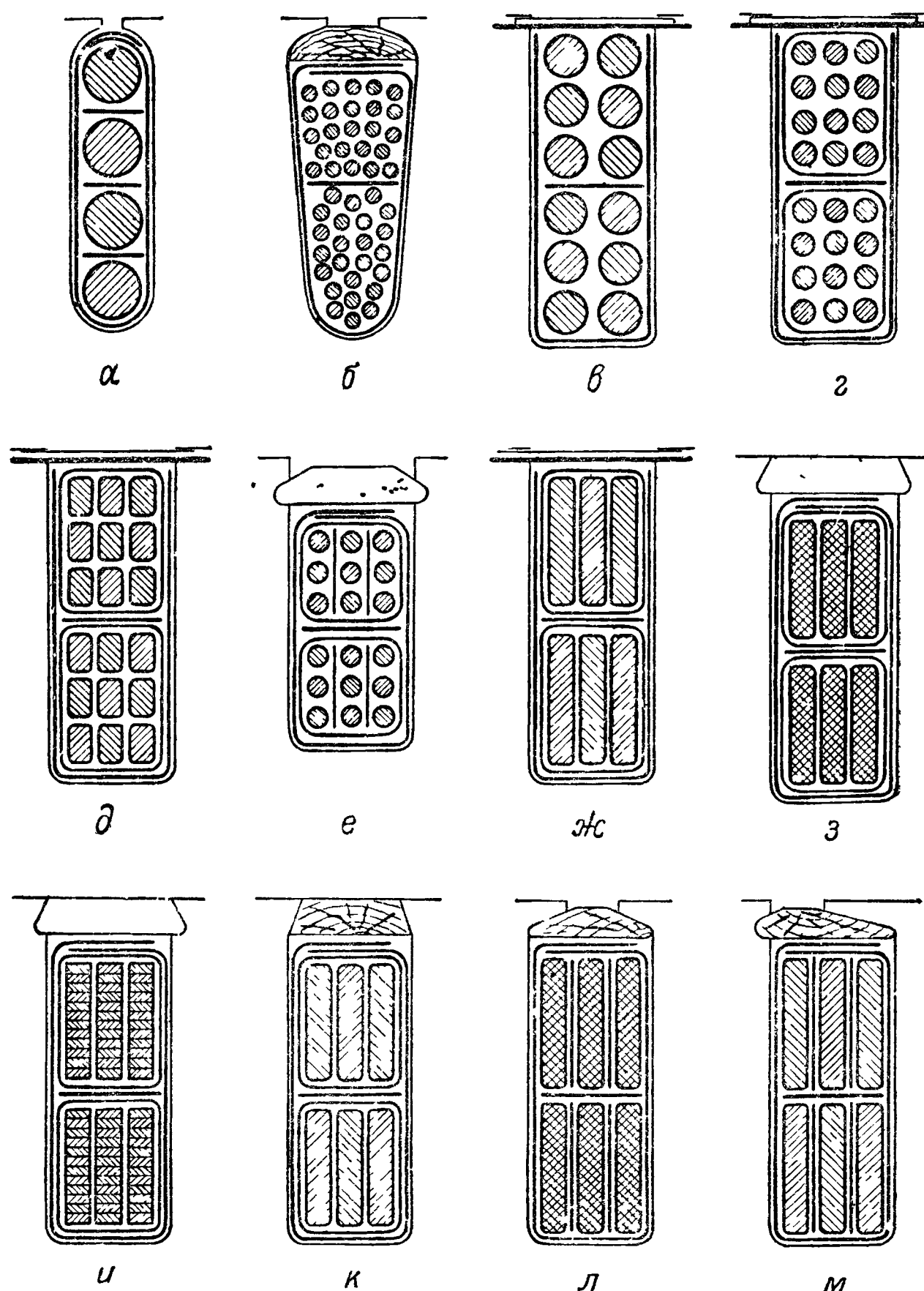
Совершенно закрытых пазов в машинах постоянного тока не делают, так как при таких пазах получалась бы слишком большая самоиндукция якорных катушек, нежелательная с точки зрения обеспечения хорошей работы машины (обеспечения хорошей коммутации). В машинах средней и большой мощности пазы делают открытыми (фиг. 40, в—к), они имеют большое преимущество перед применяемыми иногда полузакрытыми пазами (фиг. 40, л, м), так как допускают изготовление на стороне, по шаблону отдельных элементов якорных обмоток, которые затем укладывают в пазы.

Главный недостаток открытых пазов состоит в вызываемых ими пульсациях основного магнитного потока, что порождает потери от вихревых токов в полюсных башмаках и в проводниках якорной обмотки. В машинах средней и большой мощности пульсация магнитного потока сказывается на указанных потерях не особенно значительно, так как в них, с целью уменьшения влияния реакции якоря (воздействие магнитного поля якоря на основное поле, см. гл. IV), размер зазора  $\delta$  (расстояние между внешней окружностью якоря и полюсным башмаком) берется относительно большим, что ведет к уменьшению влияния пульсаций, вызываемых зубцами якоря. В машинах с уничтоженной реакцией якоря (при помощи компенсационной обмотки, § 44) допустимо меньшее значение  $\delta$ , что удешевляет машины. Вследствие этого устройство в них полузакрытых пазов становится желательным. Полузакрытые пазы применяют и для небольших машин, имеющих вообще малый зазор.

Если в полузакрытых пазах прорезь в мостике над пазом  $c_0$  не превосходит двойного размера зазора ( $c_0 < 2\delta$ ), то пульсация магнитного потока получается существенно уменьшенной, а самоиндукция секций якорной обмотки возрастает незначительно по сравнению со случаем совершенно открытых пазов.

Большой недостаток полузакрытых пазов состоит в том, что при применении их удорожается изготовление обмотки и уменьшается надежность ее изоляции, так как в этом случае проводники якорных обмоток можно вкладывать в пазы только через прорезь поодиночке.

Полузакрытые пазы при прямоугольных сечениях якорных проводов и четном числе их в слое обмотки (вверху и внизу паза) делают так, чтобы прорезь была смещена в сторону от середины паза (фиг. 40, *м*) и чтобы размер ее был на 0,5 мм шире половины паза, при этом облегчается вкладывание



Фиг 40 Различные формы пазов якорей.

изолированных проводников в паз. При трех проводниках, лежащих в одном слое, ширину прорези можно сделать на 0,5 мм шире изолированного проводника обмотки и расположить ее центрально (фиг. 40, *л*).

В небольших машинах с открытыми пазами обмотка удерживается против центробежной силы несколькими наложенными сверху бандажами из стальной проволоки (фиг. 40, *в—д, ж*). В машинах средних размеров и в больших обмотку укрепляют в пазах клиньями из высушенного и пропитанного в масле дерева твердой породы (обычно серого бука), иногда из гетинакса. В осевом направлении машин клинья делают составными.

Бандажи требуют меньше места, чем клинья, но в них получают потери. Кроме того, нужно иметь в виду, что, затрачивая на клинья больше места, мы отодвигаем верхний слой обмотки несколько дальше от наружной поверхности якоря, а это ведет к уменьшению потерь в верхнем слое обмотки от вихревых токов, вызываемых пульсацией магнитного потока. Практика пока-



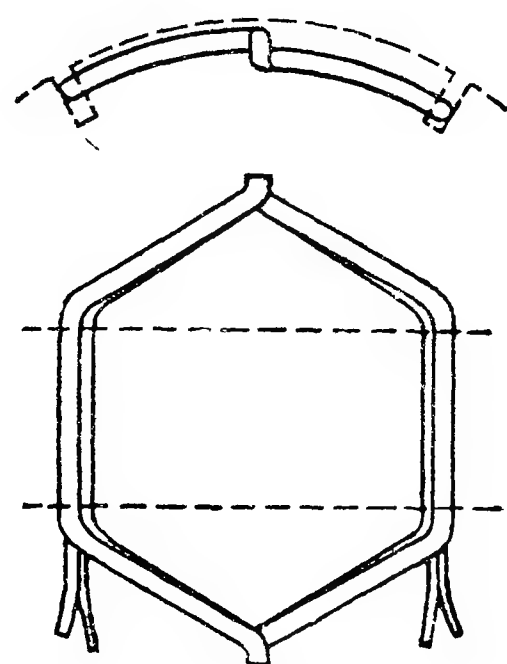
зала, что зачастую при применении клиньев выигрыш от уменьшения потерь больше, чем проигрыш от худшего использования сечения паза. По этой причине ныне нередко в тех случаях, когда раньше применяли бандажи, отдают предпочтение клиньям.

### 37. Якорная обмотка и ее укладка в пазы якоря

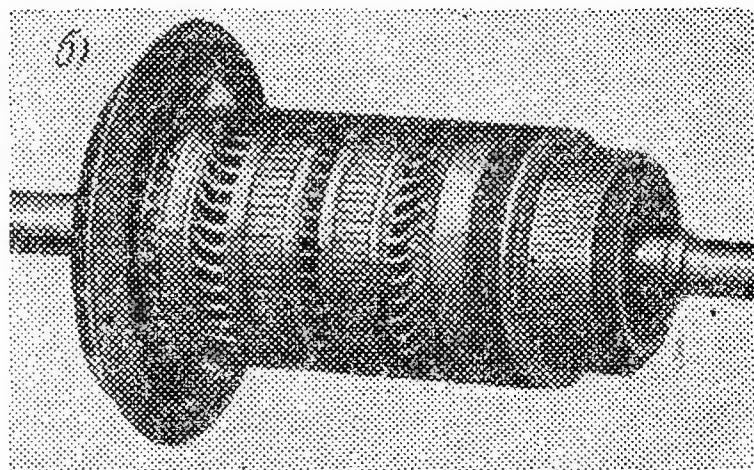
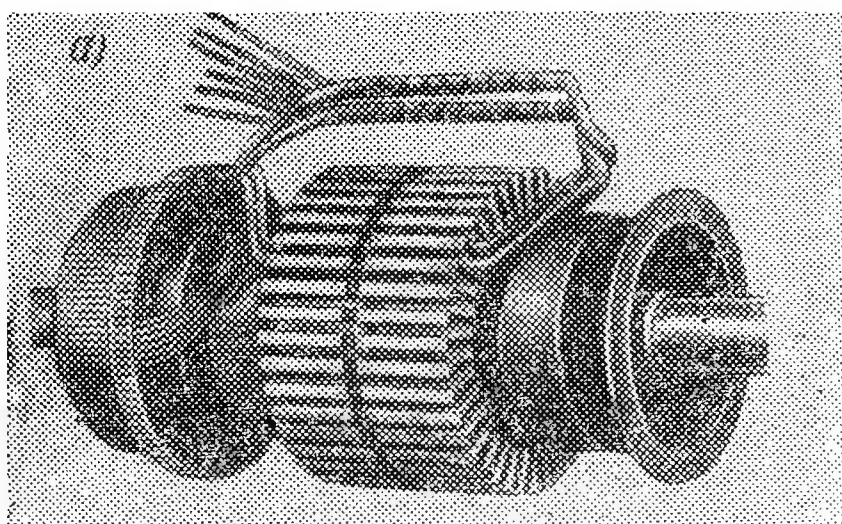
Якорную обмотку делают, как уже упоминалось, из отдельных элементов, которые носят наименование секций и имеют обычно одинаковую ширину. В этом случае обмотка распадается на совершенно тождественные шаблонные катушки якорной обмотки по числу пазов якоря (равносекционная обмотка). Исключение составляют маленькие двухполюсные машины с ручной обмоткой, а также большие машины с разносекционными (разной ширины) или ступенчатыми обмотками, применяемыми по коммутационным соображениям.

В маленьких машинах каждая секция состоит из нескольких витков, число витков в них доходит до нескольких десятков, в небольших машинах число витков в секции 3—5, а в больших — всего один виток. Секции соединяются по определенным правилам друг с другом, образуя одну независимую эл. цепь или несколько независимых эл. цепей, которые связываются друг с другом электрически (для обеспечения успешной работы машины) при помощи так называемых уравнивающих соединений.

Секции равносекционной обмотки изготавливаются на особых шаблонах. Применение шаблонов делает их совершенно одинаковых размеров, что позволяет изготавливать из них совершенно тождественные якорные катушки, изолируя вместе пазовые части секций, лежащих в одних и тех же пазах (фиг. 41).



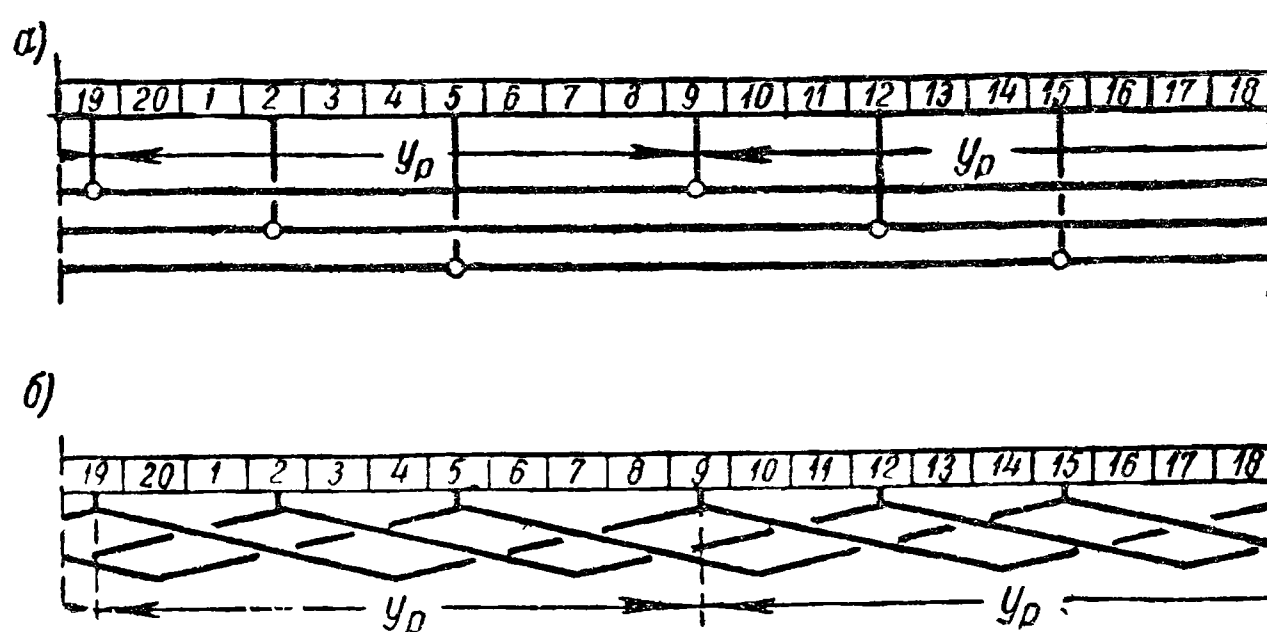
Фиг. 41. Шаблонная катушка якорной обмотки.



Фиг. 42. Якорь машины постоянного тока: а — в стадии укладки шаблонных якорных катушек в пазы; б — готовый якорь с бандажами.

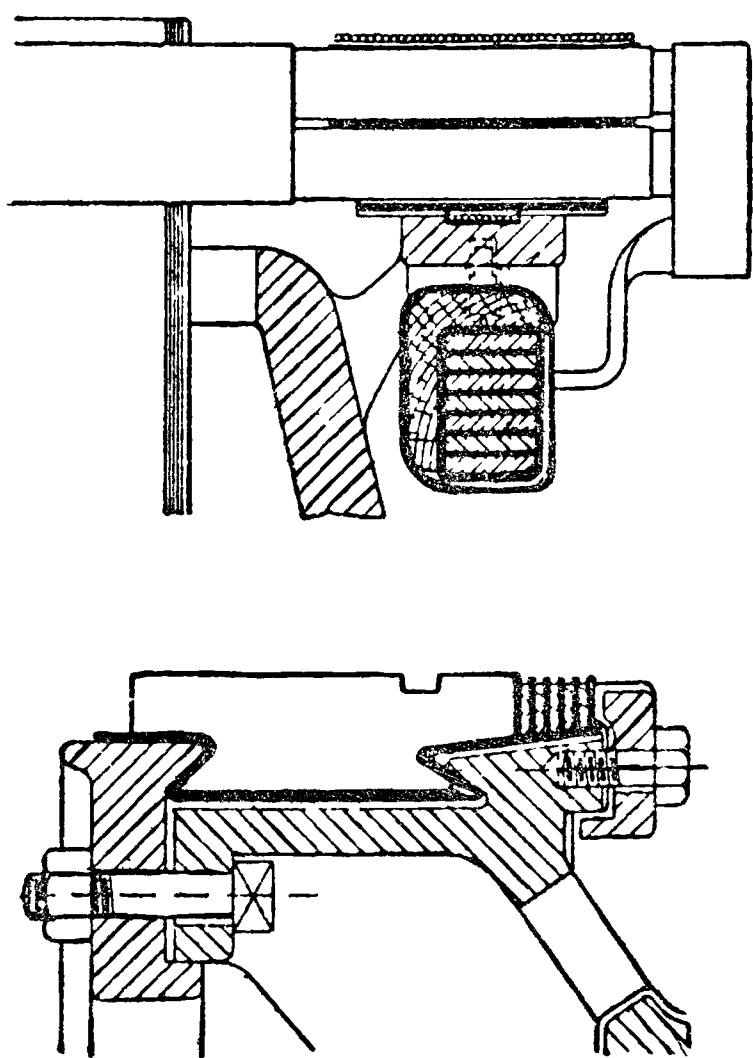
При укладке на якорь одна боковая сторона шаблонной катушки лежит внизу одного паза, другая — вверху другого паза (фиг. 42, а). Выступающие из пазов части якорных катушек носят название лобовых частей обмотки якоря. Они опираются обычно на так называемые обмоткодержатели (фиг. 42, а), связанные с крайними нижними дисками якоря рядом ребер, между которыми проходит воздух, необходимый для охлаждения лобовых частей обмотки.

На лобовые части накладывают проволочные бандажи для противодействия отгибанию их под влиянием центробежной силы, возникающей при вращении якоря (фиг. 42, б).

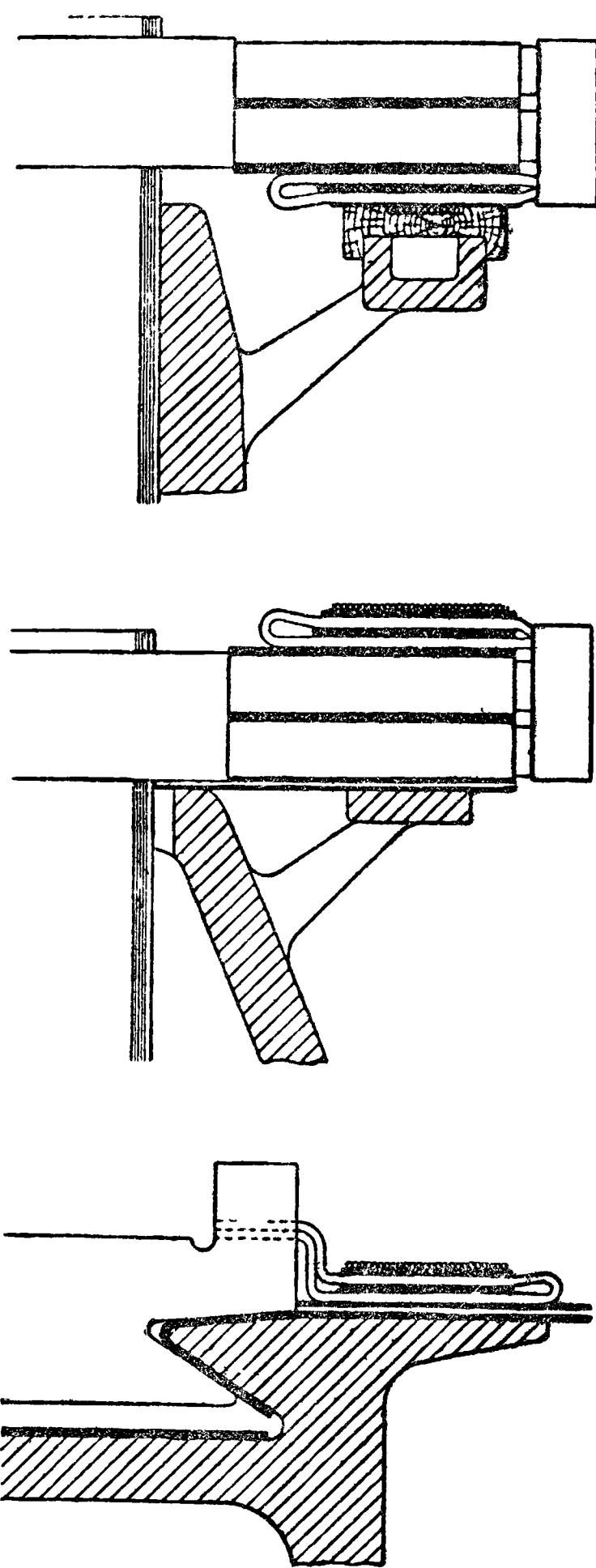


Фиг. 43. Схемы уравнительных соединений: *a* — в виде колец с ответвлениями; *b* — вилкообразных.

Проволочные бандажки, вообще говоря, рационально делать из немагнитного материала для уменьшения в них потерь на вихревые токи от потоков рассеяния магнитных полюсов машины и от неподвижных в пространстве потоков рассеяния лобовых частей обмотки от рабочих токов, проходящих по ним. При изготовлении проволочных бандажей из магнитного материала оба упомянутых потока магнитного рассеяния увеличиваются, что ведет к увеличению потерь и нагреванию лобовых частей обмотки быстроходных машин. Однако это увеличение потерь бывает особо ощутительным только в машинах с большим числом циклов перемагничивания в единицу времени



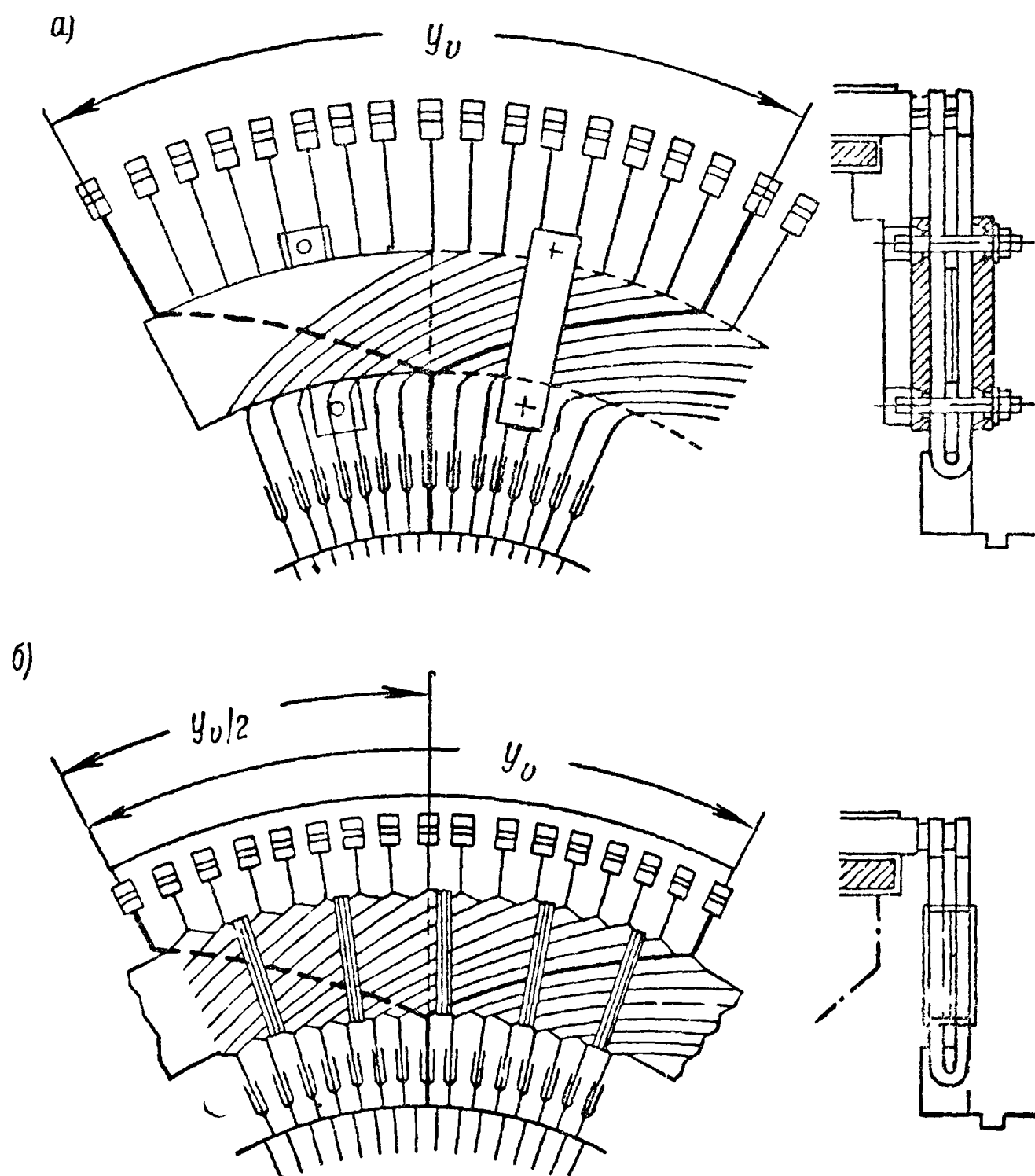
Фиг. 44. Конструктивные схемы устройства уравнительных соединений в виде колец.



Фиг. 45. Конструктивные схемы устройства уравнительных соединений в виде вилок.

Большинство типов якорных обмоток требует уравнительных соединений — соединения точек одинакового потенциала. Эти соединения выполняют либо в виде колец, присоединяемых посредством ответвлений к соответствующим

плечам якорной обмотки, либо коллектора (фиг. 43, а), или в виде вилкообразных соединений, устраиваемых наподобие лобовых частей шаблонных якорных катушек (фиг. 43, б). Кольца чаще всего устраивают со стороны, противоположной коллектору; вилкообразные соединения, наоборот, устраивают чаще всего со стороны коллектора. Некоторые конструктивные исполнения уравнивательных соединений показаны на фиг. 44 и 45.



Фиг. 46. Крепление уравнивателей, расположенных в петушках. а — посредством планок со шпильками; б — посредством шнуровых бандажей.

В тех крупных машинах постоянного тока с простыми параллельными обмотками, которые требуют устройства полного числа возможных уравнивательных соединений, их устраивают со стороны коллектора, используя их в то же время для присоединений обмотки к коллектору. Такие уравнивательные соединения называют уравнивателями в петушках (фиг. 46). Петушок — название соединительной части, связывающей обмотку якоря с коллектором; оно произошло из сходства с петушиной головой, которую эти части имели в старых конструкциях ради придания им большей жесткости.

### 38. Изоляция якорной обмотки

Изолирующие материалы, применяемые при изготовлении электромашинных обмоток, подразделяют по предельно допустимой для них температуре при продолжительной работе с номинальной нагрузкой на несколько классов. В применении к эл. машинам постоянного тока значение имеют только три основных класса изолирующих материалов, указанные в табл. 3 (из проекта нового стандарта взамен ГОСТ 183-41).

Отметим, что ныне следует пользоваться терминами: изолирующий материал класса А, или класса В, или класса С, а не терминами: изоляция класса А,

Таблица 3

Подразделение изолирующих материалов по классам изоляции

Основные классы изолирующих материалов	Описание материала
A	1. Пропитанные <sup>1</sup> или погруженные в жидкий ди-электрик органические материалы, как то хлопок, шелк, бумага и т. п 2. Материалы из пластмассы, слоистые, с заполне-нием целлюлозой; смолы фенольные и им подобные 3 Ацетил-целлюлозная пленка и другие производ-ные целлюлозы 4 Состав, именуемый эмалью, применяемый для проводников (эмалированные проводники)
B	Слюда, асбест, стеклянное волокно и подобные неор-ганические материалы с добавлением вяжущих ве-ществ, с целью крепления может быть применен и изолирующий материал класса A <sup>2</sup>
C	Слюда и стеклянное волокно без вяжущих веществ, стекло, фарфор, кварц и подобные неорганические материалы

<sup>1</sup> Изолирующий материал считается пропитанным, если пропитываю-щее вещество вытесняет собой воздух между волокнами, притом даже тогда, когда это вещество не заполняет собой полностью промежутков между отдельными изолированными проводниками Применяемое для про-питки вещество должно полностью обволакивать волокна и способствовать плотному взаимному сцеплению волокон как между собой, так и с провод-ником; оно не должно разжижаться при допустимых предельных темпе-ратурах и не должно терять своих свойств при продолжительном действии тепла.

<sup>2</sup> В обмотках с изолирующими материалами класса B, содержащими с целью крепления изолирующие материалы класса A, электрические и механические свойства не должны под действием температуры, допустимой для материала класса B, претерпевать изменения, которые могли бы сде-лать изолирующий материал непригодным для длительной эксплуатации.

класса B, класса C, так как ныне термин «класс изоляции» используется в зна-чении ступени напряжения (ГОСТ 1516-42).

В табл. 4—7 приведены данные по изоляции якорных обмоток машин по-стоянного тока, составленные Ф. С. Гланц по нормалям, действующим на заводе «Электросила».<sup>1</sup>

Табл. 4 и 5 соответствуют изоляции класса B. Как видно из таблиц, витковая изоляция выполняется из микаленты, в качестве же пазовой изоляции применяется либо микалента (табл. 4) либо микафолий (табл 5).

Изоляция по табл. 4, требующая увеличенных размеров паза, приме-няется для крупных прокатных машин, она обладает большей надежностью и, кроме того, менее чувствительна к деформациям, имеющим место при транс-портировке катушек и укладке их в пазы. Последнее преимущество этой изо-ляции имеет особо важное значение при большой длине якоря.

Изоляция класса A (табл. 6) применяется для нормальных машин по-стоянного тока мощностью до 100 квт В этом случае секции изготавлиются из провода марки ПБД, вследствие чего отпадает необходимость в дополнитель-

<sup>1</sup> Таблицы были опубликованы в сборнике «Электросила», № 4, 1947 г. Приводим их здесь вместе с пояснениями к таблицам, пользуясь разрешением автора Ф. С. Гланц и согласием редакции сборников «Электросила».



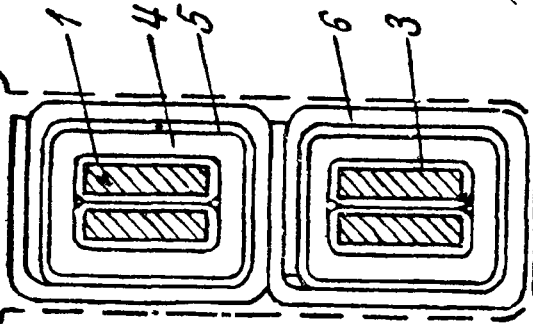
Полупроводниковых обмоток машин постоянного тока нормального исполнения  
(Изоляция класса В — микалентная)

Пазовая часть (фиг. 1 и 2)

Номера позиций	Для напряжения до 500 в				Для напряжения от 500 до 1000 в			
	Толщина материала, мм		Число слоев		Толщина материала, мм		Число слоев	
	Двусторонняя толщина изоляции, мм		По высоте		Двусторонняя толщина изоляции, мм		По высоте	
	По ширине		По ширине		По ширине		По ширине	
	Число секционных сторон в одном слое паза		Число секционных сторон в одном слое паза		Число секционных сторон в одном слое паза		Число секционных сторон в одном слое паза	
	Фиг 1	Фиг 2	1	2	3	4	Фиг 1	Фиг 2

Наименование материалов  
и допуски

Фиг. 1



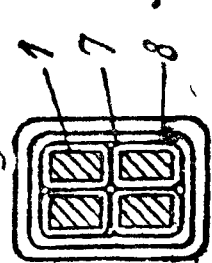
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6

Микалента на каждом проводнике в верхнем слое паза  
Микалента на каждой части подразделенного проводника в верхнем слое паза  
Микалента на каждом проводнике в нижнем слое паза  
Лакировка  
Опрессовка группы изолированных проводников  
Микалента вокруг группы проводников  
Опрессовка общей изоляции группы проводников  
Тафтяная лента впритык вокруг группы проводников  
Трехкратная пропитка в лаке  
Картон ЭВТ на группе проводников (перекрой сверху)  
Опрессовка  
Припуск  
Всего на группу проводников верхнего слоя  
Всего на группу проводников нижнего слоя  
Зазор на укладку  
Суммарный размер изоляции в пазу

0,5	—	—	—	—	—	—	—	—
—	1,0	—	—	—	—	—	—	—
0,5	0,5	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2

Лобовая часть (фиг. 3)

Фиг. 2



- 1
- 2
- 3
- 7
- 8

Микалента на каждом проводнике в верхнем слое паза  
Микалента на каждой части подразделенного проводника в верхнем слое паза  
Микалента на каждом проводнике в нижнем слое паза  
Микалента вокруг группы проводников  
Тафтяная лента вполнахлеста  
Трехкратная пропитка в лаке  
Припуск  
Всего на проводники верхнего слоя  
Всего на проводники нижнего слоя

0,5	—	—	—	—	—	—	—	—
—	1,0	—	—	—	—	—	—	—
0,5	0,5	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2

Фиг. 3

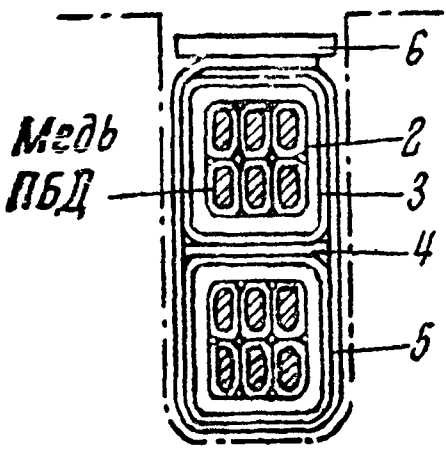
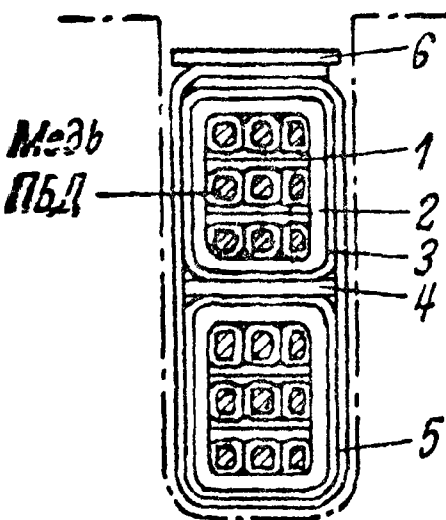
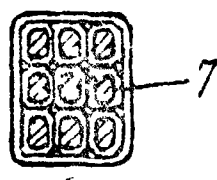
При мечании. Допускаемые отклонения в размерах: по ширине ±0,10 мм, по высоте +0; —0,20 мм.



Таблица 6

Изоляция якорных обмоток машин постоянного тока нормального исполнения до 500 в  
(Изоляция класса А, медь ПБД)

Пазовая часть (фиг. 1 и 2)

	Номера по- зиций	Наименование материалов и допуски	Толщина ма- териала, мм	Число слоев	Двусторонняя толщина изоляции, мм.		
					По высоте		По ши- рине
					Фиг. 1	Фиг 2	
	1	Картон ЭВТ—про- кладка <sup>1</sup> между провод- никами . . . . .	0,2	1	—	0,2 на колич прокл	—
		Пропитка . . . . .	—	1	0,2		0,2
	2	Опрессовка группы проводников . . . . .	—	—	Опрессовка		
	3	Микалолий вокруг каж- дой стороны катуш- ки (перекрой сбоку)	0,15	2 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	0,6		0,75
	4	Фенальденовая бумага вокруг каждой стороны катушки (перекрой сбо- ку) . . . . .	0,07	2 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	0,28		0,35
		Опрессовка сторон катуш- ки . . . . .	—	—	Опрессовка		
	5	Всего на каждую сто- рону катушки . . . . .	—	—	1,1	1,1 без поз 1	1,3
	6	Картон ЭВТ—про- кладка между верхним и нижним слоем . . . . .	0,3	—	0,3		—
	7	Картон ЭВТ—выклад- ка паза (перекрой свер- ху) . . . . .	0,2	1 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	0,6		0,4
	8	Картон ЭВТ — про- кладка под бандаж . . . . .	0,5	—	0,5		—
	9	Запор на укладку . . . . .	—	—	0,2		0,2
	10	Суммарный размер изоляции в пазу . . . . .	—	—	3,8	3,8 без поз 1	1,9
Лобовая часть (рис 3)							
	11	Пропитка . . . . .	—	1	0,2		0,2
	12	Миткалевая лента вполнахлеста . . . . .	0,15	1	0,6		0,6
	13	Припуск . . . . .	—	—	0,5		0,5
	14	Всего на катушку . . . . .	—	—	1,3		1,3

<sup>1</sup> Число прокладок поз 1 равно числу витков в секции по высоте без одного

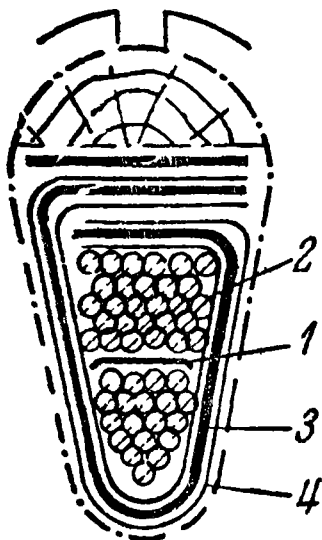
ной витковой изоляции. При одновитковых секциях витки делаются из двух параллельных проводников марки ПБД, которые располагаются друг над другом по высоте катушки. Применение подразделения проводника по высоте объясняется стремлением унифицировать размеры меди для одновитковых и двухвитковых секций, а также тем, что при намотке секций из высокого проводника марки ПБД часто происходят повреждения изоляции.

В табл. 7 содержатся данные по изоляции так называемых всыпных якорных обмоток для машин малой мощности, т. е. когда витки всыпаются через прорезь полузакрытого паза.

Таблица 7

Изоляция якорных всыпных обмоток машин постоянного тока  
нормального исполнения до 500 в  
(Изоляция класса А, медь ПБД или ПЭБО)  
Пазовая часть (фиг. 1)

Номера позиций	Наименование материалов и допуски	Толщина материала, мм	Число слоев	Двусторонняя тол- щина изоляции, мм	
				по высоте	по шири- не
1	Картон ЭВТ—прокладка между катушками . . . . .	0,5	—	0,5	—
2	Картон ЭВТ—проходная коро- бочка . . . . .	0,2	1 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	0,6	0,4
3	Эксцельсиор <sup>1</sup> . . . . .	0,2	1 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	0,6	0,4
4	Картон ЭВТ—выкладка паза . .	0,2	1 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	0,6	0,4
5	Суммарный размер изоляции в пазу . . . . .	—	—	2,3	1,2



Фиг 1

Лобовая часть

В лобовых частях между катушками проложить прокладки из картона ЭВТ толщиной 0,2 мм

<sup>1</sup> При усиленной изоляции эксцельсиор заменяется миканитом

39. Коллектор

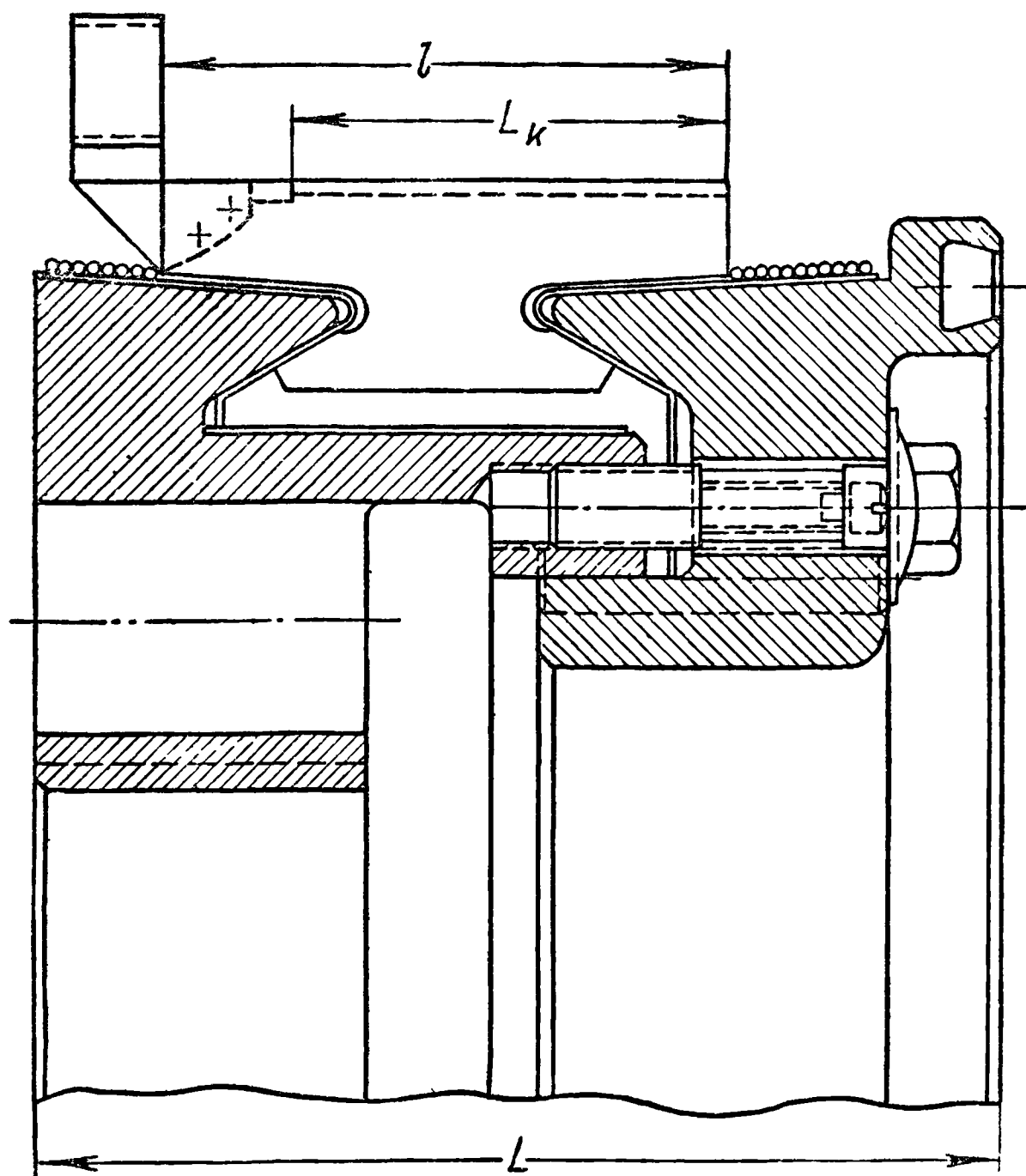
Коллектор состоит из медных пластин, изолированных друг от друга и от частей, несущих его. Пластины соединяются по определенным правилам с началами и концами секций якорной обмотки. Материалом для коллекторных пластин служит вальцованная твердотянутая медь, обладающая высокой электропроводностью и повышенными механическими свойствами: пределом текучести — около 28 кг/мм<sup>2</sup>, удлинением — около 18%, твердостью по Бринелю — около 85.

Изоляция между пластинами коллектора делается прокладками из специального твердого миканита, называемого коллекторным миканитом. Толщина  $\delta_i$  прокладок берется в пределах  $\delta_i = 0,4 \div 1,0$  мм, в зависимости от диаметра коллектора  $D_k$ , ширины пластин  $\beta_k$  по наружной окружности коллектора и от номинального напряжения машины  $U_N$ . При напряжении машины  $U_N \geq 500$  в, а также в тех случаях, когда можно опасаться появления на коллекторе кругового огня, толщина прокладок доходит до  $\delta_i = 1,2$  мм. Для изоляции коллекторных пластин от несущих их частей применяется г и б к и й м и к а н и т с большим содержанием шеллака, до 6%, в маленьких машинах иногда применяют прессшпан.

Ширина коллекторных пластин по верху  $\beta_k = 4,0 \div 15,0$  мм, в среднем для обычных машин около 7,5 мм. По соображениям механической прочности коллектора желательно брать  $\beta_k \leq 4$  мм.



В конструктивном отношении коллектор является наиболее чувствительной и ответственной частью машины постоянного тока. При работе температура его возрастает вследствие нагревания его током и от трения щеток. Разница в температурных коэффициентах расширения меди коллектора ( $1,65 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{град}}$ ) и стальных частей ( $1,3 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{град}}$ ), которыми он крепится, вызывает большие внутренние механические напряжения в этих материалах, вследствие чего было делом весьма трудным придать коллектору такую конструкцию, чтобы при чередующихся нагреваниях и охлаждениях его он сохранял строго



Фиг 47. Конструкция коллектора

цилиндрическую форму, в особенности, если принять во внимание, что миканитовая изоляция, отделяющая коллекторные пластины от несущих их железных частей, представляет собой материал, поддающийся сжатию.

Из многих предлагавшихся конструкций лучше всего оправдала себя и вошла во всеобщее употребление для нормальных машин постоянного тока нижеследующая. Идея ее заключается в зажатии коллектора между двумя конусообразными кольцевыми выступами (с соответствующими изолирующими прокладками, которые носят название *манжет* (фиг. 47)

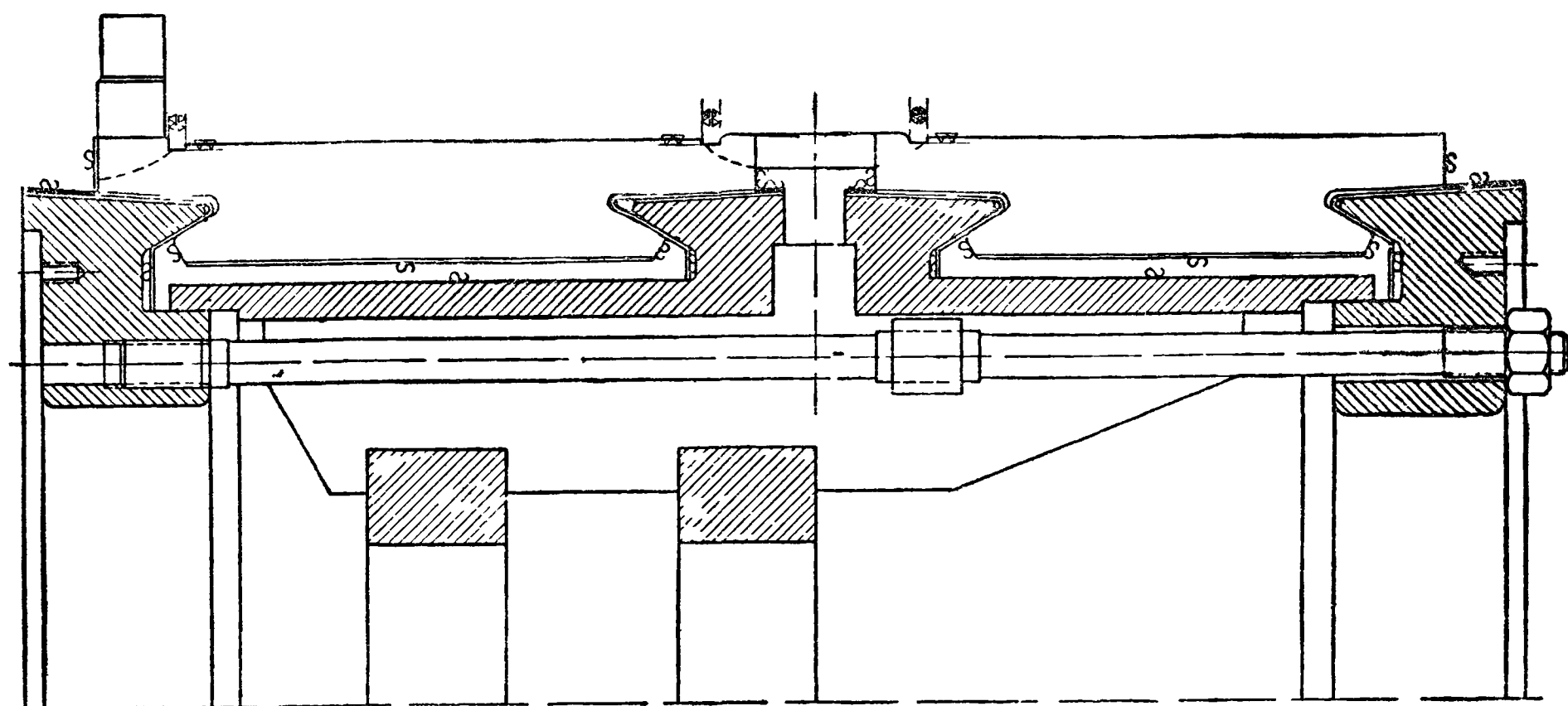
На выступающую часть изоляции кладут у торцов коллекторных пластин, для предупреждения выкрашивания миканита, бандаж из бечевки.

Пластины коллектора, вследствие наличия в нижней части их выступа в виде ласточкина хвоста, имеют характерный вид.

Описанная конструкция имеет, однако, предел своей применимости, а именно, длина пластин должна быть не более 60 см и окружная скорость по коллектору не более 35—40 м/сек. При длинах коллекторных пластин  $L_k > 60$  см переходят к устройству сдвоенного коллектора (фиг. 48) или к устройству коллектора с пластинами без ласточкиных хвостов, насаживаемыми горячей посадкой на миканитовый пояс и сжимаемыми предвари-

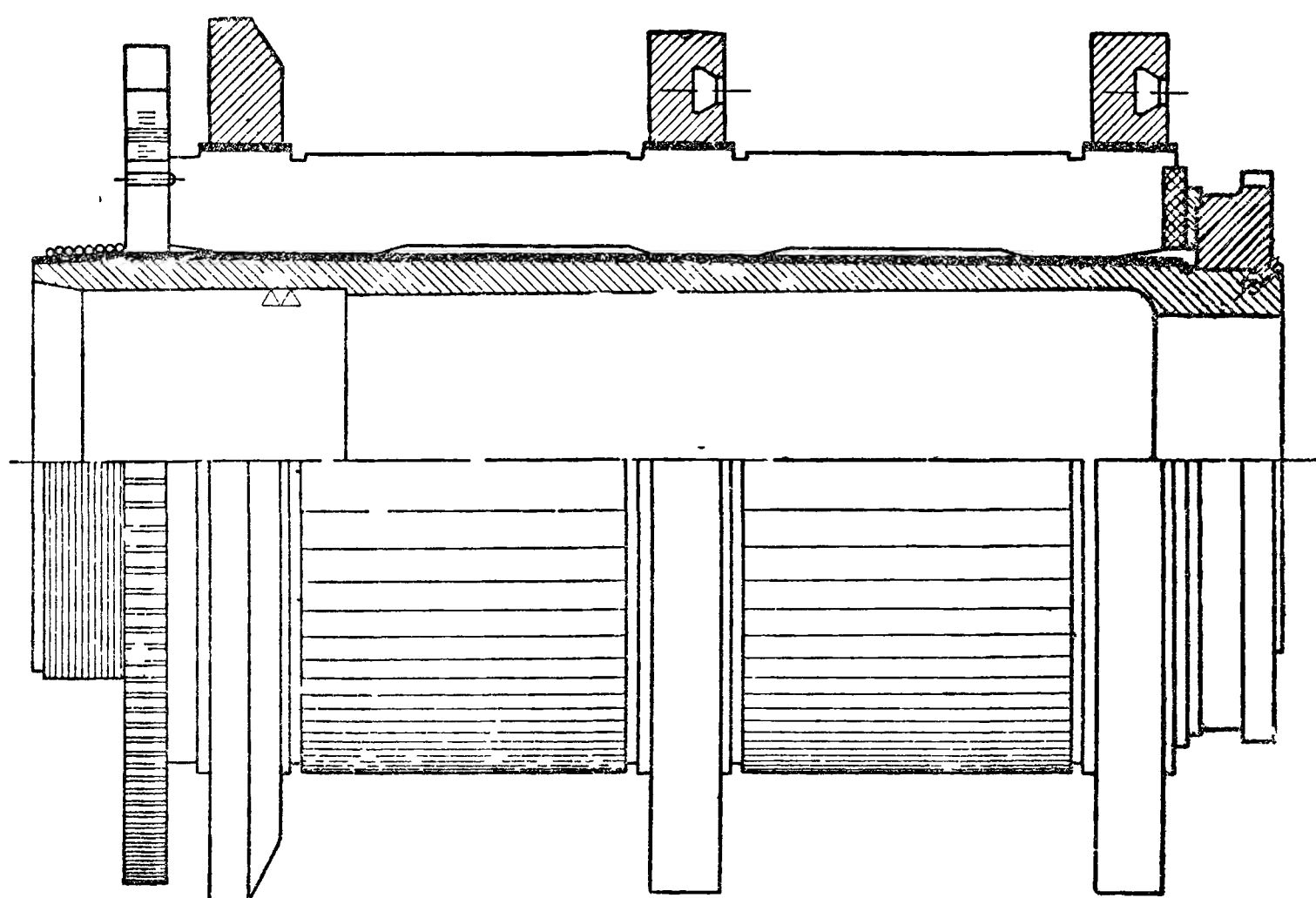
тельно нагретыми стальными кольцами, под которые на пластины накладывается тоже миканитовый пояс (фиг. 49).

Зажим коллекторных пластин помощью конусов осуществляется в небольших машинах или при помощи нажимных гаек, или при помощи винтов, как показано на фиг. 47.



Фиг. 48. Сдвоенный коллектор.

При коллекторных пластинах, достигающих до предельной длины  $L_k = 60$  см, предпочтительнее, повидимому, зажимать их не короткими нажимными винтами, а при помощи длинных стяжных шпилек, так как они лучше следуют за изменением длины пластин при изменении их температуры (фиг. 48).



Фиг. 49. Коллектор с бандажными кольцами.

Ступица, на которую насаживается коллектор, должна иметь осевые каналы для охлаждения (фиг. 47). Устройство таких каналов затруднительно при небольших диаметрах коллектора. В больших машинах, якорная ступица которых получает форму якорного колеса, коллектор крепится часто к спицам этого колеса.

Соединение якорной обмотки с коллектором осуществляется в малых машинах, имеющих обмотку из круглого проводника, непосредственно, так как

в этих случаях разница между диаметром якоря  $D_a$  и диаметром коллектора  $D_k$  незначительна.

В машинах, обмотка якоря которых выполнена из проводников прямоугольного сечения, соединение обмотки с коллектором производят при помощи особых медных пластин, получивших на наших заводах название **п е т у ш к о в**.

В больших машинах делают диаметр коллектора значительно меньше диаметра якоря ради экономии материалов, доходя до  $D_k = 0,6 D_a$ . В этих случаях петушки получают значительную длину, а следовательно, и увеличенную стоимость, что следует учитывать при сравнении разных вариантов  $D_k$ . При этом нужно учесть еще одно обстоятельство, а именно, что, во избежание замыкания петушков во время вращения машины, приходится устанавливать специальные дистанционные распорки, чтобы придать петушкам надлежащую жесткость.

#### 40. Детали токособирающего аппарата

а) **Щетки**. В настоящее время для машин постоянного тока применяют почти исключительно угольные щетки с примесью графита, носящие, в зависимости от процентного содержания графита и от способа изготовления щеток, названия угольно-графитовых, графитовых, либо электрографитовых. Лишь для машин на небольшие напряжения, до 30 в, применяют металлоугольные щетки, дающие меньшее падение напряжения в контактном (переходном) слое на коллекторе.

**У г о л ь н ы е щ е т к и** изготавливаются из чистого графита, ретортного угля и сажи в разнообразных пропорциях.

**Г р а ф и т о в ы е щ е т к и** изготавливаются из чистого природного графита; графит измельчается в мелкий порошок, который затем прессуется под очень большим давлением в бруски нужных размеров.

**Э л е к т р о г р а ф и т о в ы е щ е т к и** — это, по существу, угольные щетки, но подвергнутые воздействию высокой температуры в электрической печи и превращенные таким образом в графитовые. Эти щетки обладают свойством очень хорошо шлифоваться.

**М е т а л л о - у г о л ь н ы е щ е т к и** изготавливаются из угля и меди, измельченной в мелкий порошок, иногда с прибавкой другого измельченного металла (чаще всего олова). Изготовление этих щеток ведется таким образом, чтобы щетка обладала возможно лучшей проводимостью в осевом направлении, в котором проходит рабочий ток машины, и плохой проводимостью (большое эл. сопротивление) в поперечном направлении, в котором происходит при коммутации замыкание добавочных токов коммутируемых секций. Соотношение электропроводностей в продольном и поперечном направлениях металлоугольных щеток разных заводов доходит до 1 : 12. В СССР щетки для эл. машин стандартизованы (см табл. 8, заимствованную из ГОСТ 2332-43 с изменением № 2 и некоторыми добавлениями).

Число зон (образующих цилиндрической поверхности коллектора) установки щеток на коллекторе обычно равно числу полюсов машины. Число щеток в каждой зоне зависит от величины тока и допустимой для данного сорта щетки плотности тока под щеткой, однако меньше двух щеток на зону можно встретить только в очень маленьких машинах, так как при одной щетке на зону трудно обеспечить надежность щеточного контакта. Щетки, стоящие в одной и той же зоне, будем называть **з о н н ы м к о м п л е к т о м щ е т о к**, а совокупность всех зонных комплектов данной машины — **п о л н ы м к о м п л е к т о м щ е т о к**.

Торцевую поверхность щеток со стороны, противоположной соприкосновению с коллектором, обычно обмедняют, иногда лудят. При небольшом токе, отводимом щеткой, достаточно удовлетворительные условия отвода тока обеспечиваются поверхностью соприкосновения щетки со щеткодержателем и

Технические характеристики электро

Класс щеток	Группа	Марка	Номинальная плотность тока, а/см²	Максимальная окружная скорость, м/сек	Максимальная угловая скорость, тыс об/мин.	Удельное нажатие, Г/см²	Удельное электрическое сопротивление, ом мм²/м		Твердость по Шору
							Метод амальгамы	Метод разделенных контактов	
Угольно-графитные	2б	Т2	6	10	1,5	200—250	40—60	38—58	45—58
	3д	Т6	6	10	1,5	200—250	40—60	38—58	45—58
	2б	УГ2	8	15	2,0	200—250	18—30	17—30	40—60
	2б	УГ4	7	12	1,8	200—250	26—38	25—38	45—65
Графитные	2а—3а	Г1	7	12	1,8	200—250	30—46	29—46	35—50
	2а—3а	Г2	8	15	2,0	200—250	25—37	24—37	40—50
	3а	Г3	10—11	25	3,5	200—250	10—20	8—20	30—40
	3д	Г6	9	18	2,5	200—250	25—42	25—42	35—50
	3д	Г8	11	25	3,0	200—300	10—20	8—20	20—40
Электрографитированные	4б	ЭГ2	10	25	3—5	200—250	20—30	15—30	46—60
	4б	ЭГ2а	10	45	4—7	—	18—35	14—35	—
	4а	ЭГ4	12	40	3,0	150—200	10—16	8—16	20—30
	4а	ЭГ5	12	40	3,5	—	10—25	8—20	—
	4в	ЭГ8	10	40	5—8	200—400	40—50	31—50	42—55
	4в	ЭГ9	10	40	5—8	—	35—55	28—50	—
	4в	ЭГ10	9	—	5—8	200—250	40—56	28—50	50—70
	4в	ЭГ11	10—11	40	4—5	—	26—42	22—40	—
	4в	ЭГ12	10—11	40	4—5	—	26—42	22—40	—
	4в	ЭГ13	10—11	40	5—6	—	26—42	22—40	—
	4в	ЭГ14	10—11	40	4—5	200—400	26—38	22—36	40—60
	4в	ЭГ83	9	45	6—9	175—220	35—65	40—55	15—32
	4в	ЭГ84	9	45	7—10	—	35—65	35—60	—
Медно-графитные	1г	М1	15	25	3,5	150—200	2—6	1—6	26—38
	1г	М3	12	20	3,0	150—200	7—12	5—12	30—40
	1г	М6	15	25	3,5	150—200	2—6	1—6	26—35
	1г	М20	12	20	3,5	150—200	5—13	4—12	24—36
	1б	МГ	20	20	1,5	180—230	0,05—0,15	0,03—0,15	—
	1б	МГ2	20	20	1,8	180—230	0,15—0,35	0,10—0,35	—
	1в	МГ4	15	20	1,8	200—250	0,3—1,3	0,2—1,3	22—32
	1в	МГ6	18	20	1,8	200—250	0,3—1,3	0,2—1,3	18—30
	1а—1г	МГС5	15	35	4—5	—	2—15	1—12	—
Бронзо-графитные	1а—1г	МГС6	15	25	4—5	—	3—14	1—12	—
	1а	МГС	20	20	2,0	—	0,1—0,3	0,05—0,25	—
	1а	БГ	20	20	1,5	170—220	0,5—0,9	0,3—0,8	—

нажимной пружиной Щетки больших размеров снабжают плотно надетыми на них колпачками из листовой меди и прикрепленными к ним поводками из медных гибких канатиков соответствующих сечений, с наконечниками для присоединения под винтик к щеткодержателю или к детали, предназначенной для отвода от щетки тока. Колпачок щетки с канатиком называют арматурой щетки.

б) Щеткодержатели. Щетки удерживаются в фиксированном относительно коллектора положении щеткодержателями, конструкции которых весьма разнообразны.



Таблица 8

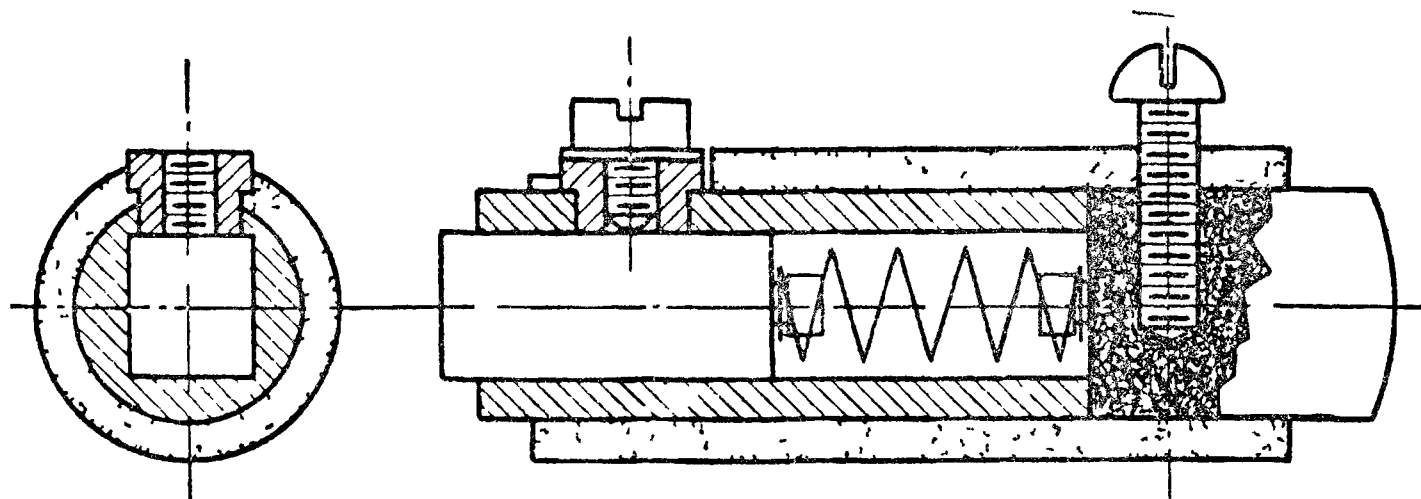
щеток отечественного производства

Твердость по методу вдавливания (ФННН), кг/мм²	Содержание (средние значения)			Переходное падение напряжения на пару щеток, в	Коэффициент трения	Износ за 50 час, мм	Коммутация	Краевое напряжение, в
	Меди, %	Свинца, %	Олова, %					
16—80	—	—	—	1,5—2,5	0,30	0,10	Несколько затрудненная	8—12
12—60	—	—	—	1,5—2,5	0,30	0,10	»	8—12
15—50	—	—	—	1,6—2,4	0,25	0,30	Нормальная	5—10
15—60	—	—	—	1,6—2,6	0,25	0,30	Несколько затрудненная	8—12
15—50	—	—	—	1,7—2,7	0,30	0,20	Нормальная	5—10
9—40	—	—	—	1,2—2,2	0,25	0,15	»	5—10
10—35	—	—	—	1,5—2,3	0,25	0,20	»	3—7
8—32	—	—	—	1,6—2,8	0,25	0,20	»	5—10
6—30	—	—	—	1,5—2,3	0,25	0,15	»	3—7
10—40	—	—	—	2,15—3,35	0,20	0,10	Несколько затрудненная	8—12
12—50	—	—	—	2,0—3,2	0,23	0,15	»	8—12
3—9	—	—	—	1,6—2,4	0,20	0,25	Нормальная	2—5
3,5—12	—	—	—	1,8—3,0	0,25	0,20	»	2—5
12—65	—	—	—	1,9—2,9	0,25	0,15	Самая затрудненная	15—20
30—80	—	—	—	2,4—3,4	0,25	0,15	»	15—20
35—90	—	—	—	1,8—3,0	0,25	0,15	»	15—20
10—45	—	—	—	2,5—3,5	0,25	0,15	Затрудненная	10—15
10—45	—	—	—	2,5—3,5	0,25	0,15	»	10—15
10—50	—	—	—	2,5—3,5	0,25	0,15	»	10—15
10—45	—	—	—	2,0—3,0	0,25	0,15	»	10—15
8—20	—	—	—	—	0,25	—	Самая затрудненная	20 и выше
12—40	—	—	—	2,5—3,5	0,25	0,15	»	20 и выше
12—35	52	—	—	1,0—2,0	0,25	0,18	Облегченная	1—1,5
9—28	27	—	—	1,4—2,2	0,25	0,15	»	1—1,5
10—30	52	—	—	1,0—2,0	0,20	0,15	»	1—1,5
8—25	27	—	—	1,0—1,8	0,26	0,20	»	1—1,5
6—18	91	—	—	0,1—0,3	0,20	0,80	Самая легкая	до 0,5
6—14	81,5	—	0,5	0,3—0,7	0,20	0,40	»	0,5—1
5—36	72	—	—	0,6—1,6	0,20	0,30	»	0,5—1
8—28	72	—	—	0,6—1,4	0,20	0,50	»	0,5—1
8—28	51	7	—	не более 2,0	0,25	0,50	Облегченная	1—1,5
0—30	51	5	—	не более 2,0	0,25	0,25	Облегченная	1—1,5
0—20	88	7	—	не более 0,4	0,25	0,25	Самая легкая	до 0,5
0—16	79	—	9	0,2—0,4	0,25	0,25	»	до 0,5

На фиг. 50 представлен простейший щеткодержатель для машин мощностью меньше 0,25 квт. Отвод тока осуществляется через трубчатую обойму щетки, которым зажимается наконечник проводника, идущего к внешнему зажиму машины.

В более крупных машинах применяют щетки прямоугольного сечения. В машинах мощностью до 5 квт применяют щеткодержатели, изготовленные из латуни, одна из таких конструкций приведена на фиг. 51. Для более мощных машин применяют щеткодержатели более надежные, более сложные и более дорогие (фиг. 52). Если машина предназначена

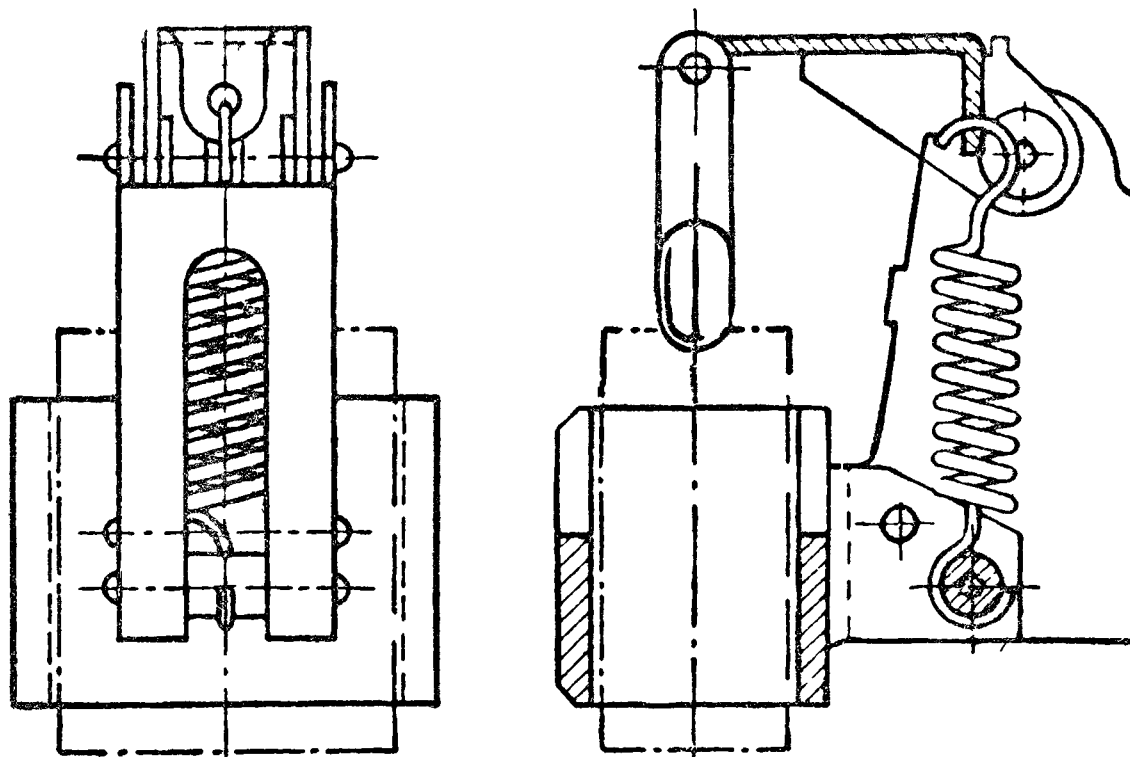
для обоих направлений вращения, то применяют радиальные щеткодержатели (фиг. 53), обеспечивающие расположение щетки по радиусу коллектора. В машинах с одним определенным направлением вращения часто применяют щеткодержатели с некоторым наклоном щетки к радиусу. Если щетка наклонена против вращения, то щеткодержатель называется *наклонным щеткодержателем*. Если же щетка наклонена в сторону вращения машины,



Фиг. 50. Простейший щеткодержатель

то щеткодержатель носит название *реактивного щеткодержателя*; он имеет некоторые преимущества, но требует выполнения определенных условий и чаще выходит из строя, чем радиальный щеткодержатель.

в) Щеточные пальцы, или бракеты, траверсы. Щеткодержатели одной зоны укрепляют на щеточных пальцах круглого или квадратного сечения либо на щеточных бракетах. Щеточные пальцы или бракетки разных зон установки

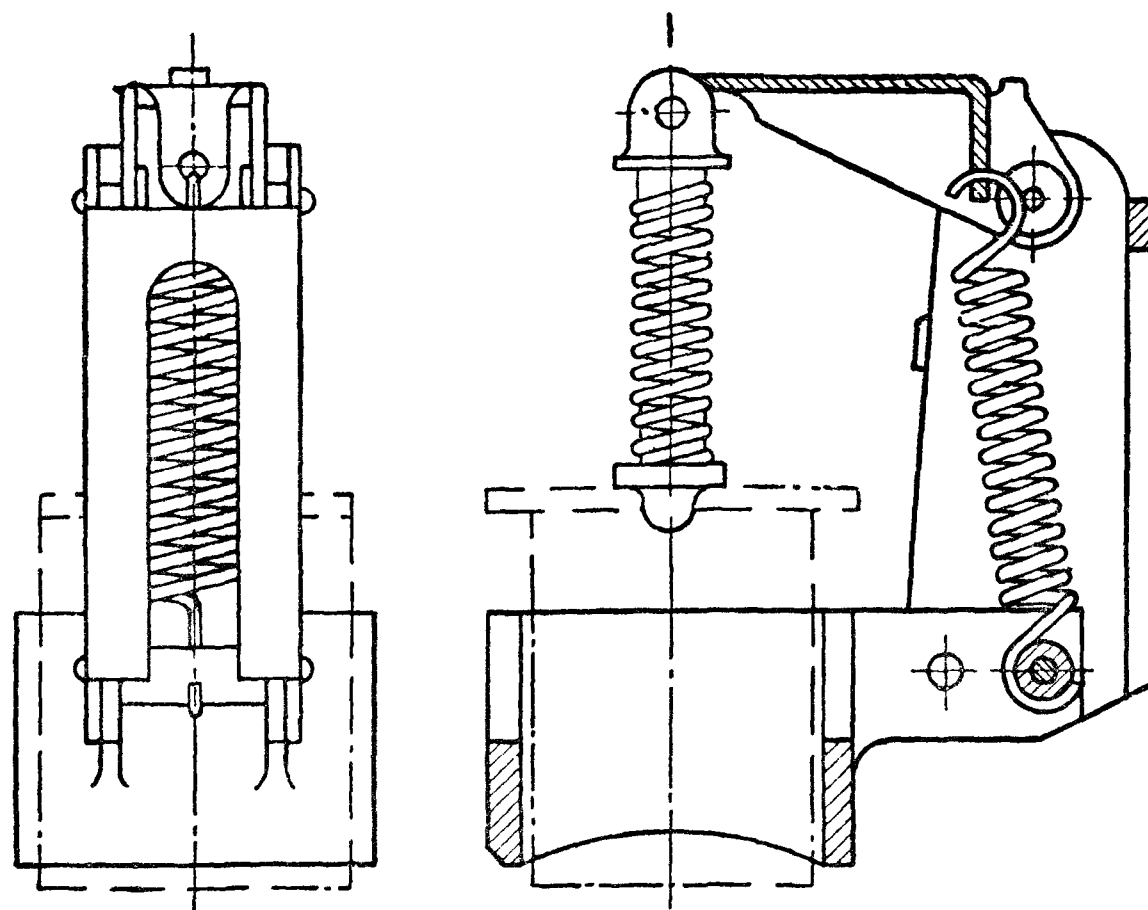


Фиг. 51. Щеткодержатель для щеток машин малой и средней мощности.

щеток укрепляют на *щеточных суппортах* или *щеточных траверсах*, от которых они должны быть надежно изолированы. В свою очередь, щеточные траверсы крепят либо к подшипникам, либо к подшипниковым щитам, либо к ярму или, наконец, устанавливают независимо на фундаментную плиту машины (при больших длинах коллектора)

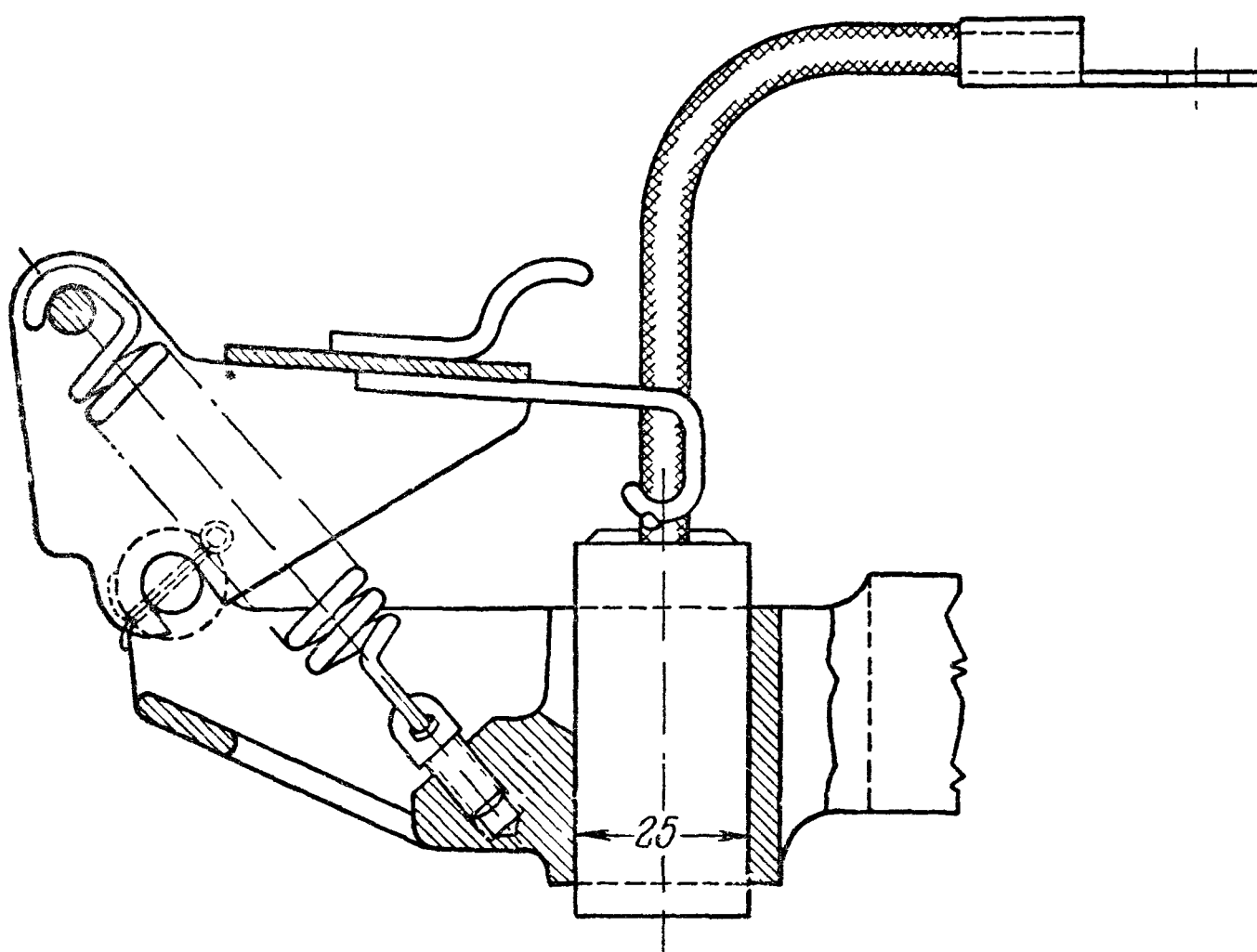
Непременными условиями, которым должны удовлетворять щеточный суппорт или щеточная траверса, являются: безусловное отсутствие вибраций, доступность осмотра щеток и их регулировки, легкий съем отдельных щеткодержателей для ремонта и возможность одновременного поворота всей системы щеток для точной установки их в надлежащем для коммутации положении при сохранении полной concentricности щеткодержателей и коллектора.

г) Токособираательные соединения; коробка зажимов. Для отвода тока щеточные пальцы и бракетки одноименных зон (т. е. одной и той же полярности,



Фиг. 52. Щеткодержатель крупной машины постоянного тока.

положительные или отрицательные) соединяют электрически друг с другом изолированным проводом соответствующего сечения (при небольших токах и небольшом числе одноименных зон) или прямоугольными шинами. Таким

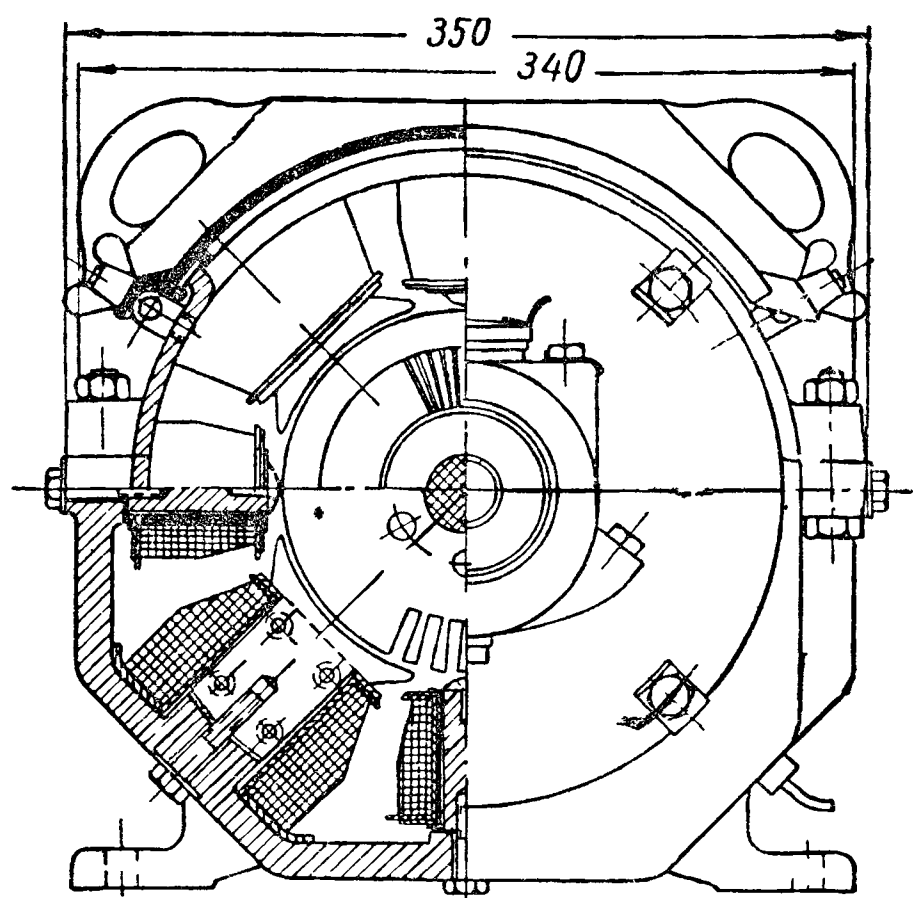


Фиг. 53. Радиальный щеткодержатель.

образом, получают два собирательных полных или неполных кольца, которые затем присоединяют посредством гибких кабелей соответствующего сечения к внешним зажимам машины. Последние крепят на особой доске зажимов либо к ярму, либо к фундаментной плите машины. Прикрытая защитной крышкой доска зажимов образует коробку зажимов.

#### 41. Ярмо, фундаментные плиты, салазки

Обычно ярмо делают в виде кольца как с целью придания ему наибольшей механической прочности, так и для удобства обработки. Лишь в тех случаях, когда требуется особая компактность конструкции (тяговые и крановые двигатели, судовые машины), ярму придают форму многоугольника (фиг. 54).

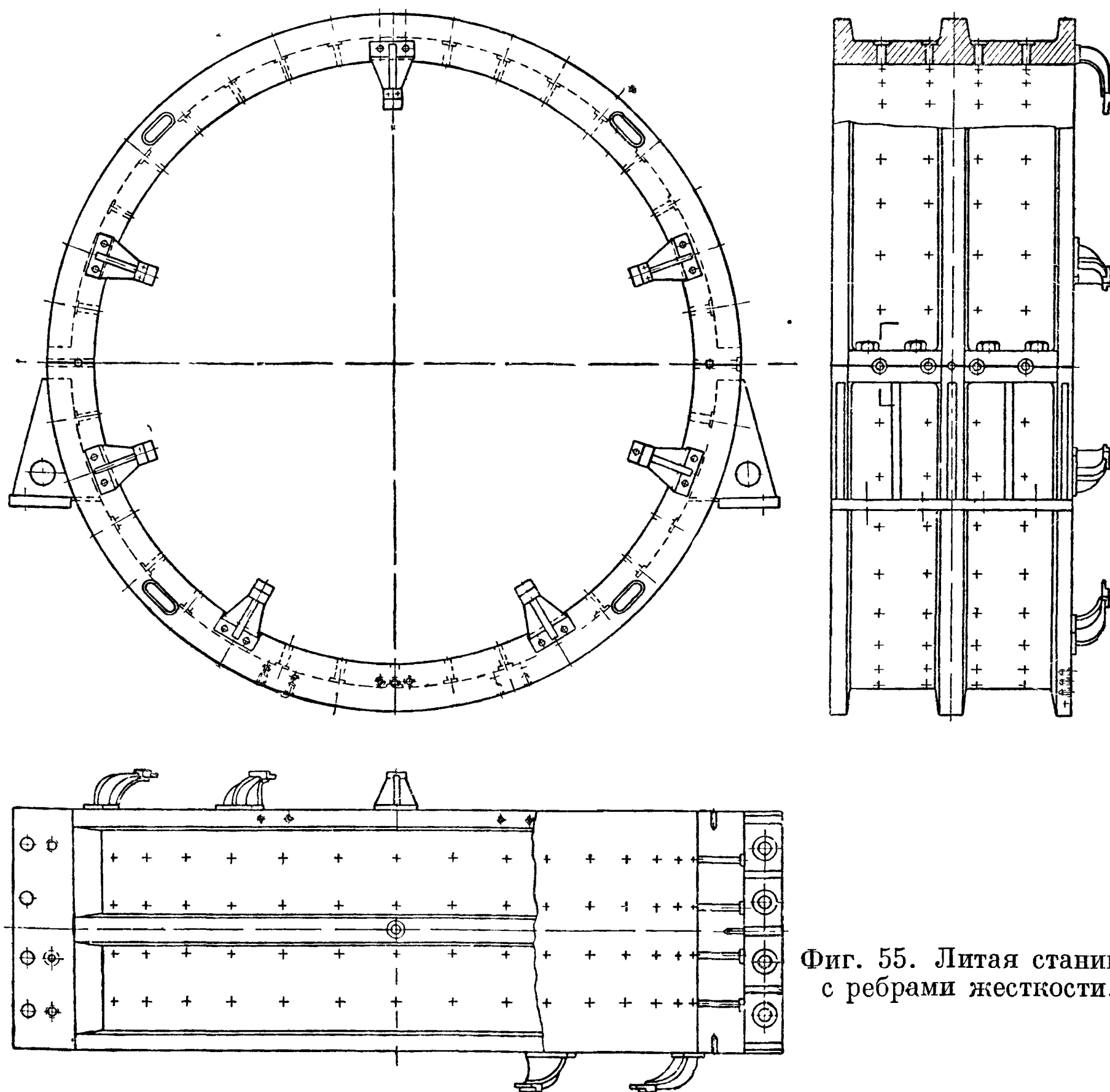


Фиг 54. Машина постоянного тока с ярмом в форме многоугольника.

Площадь сечения ярма определяется проходящим по нем магнитным потоком и индукцией, допустимой по расчетным соображениям для выбранного материала. Материалом служит чугун, литая сталь, катаная сталь. При том же заданном магнитном потоке необходимое сечение получается при катаном материале таким же, как и при стальном литье, при чугунном литье приблизительно на 100% больше.

В настоящее время ярмо делают преимущественно из толстых листов катаной стали, которые выгибают по соответствующему радиусу и сваривают в кольцо. Это делают при высоте ярма, примерно, до 120 мм. При больших сечениях переходят к литым стальным конструкциям из полуколец, устраивая

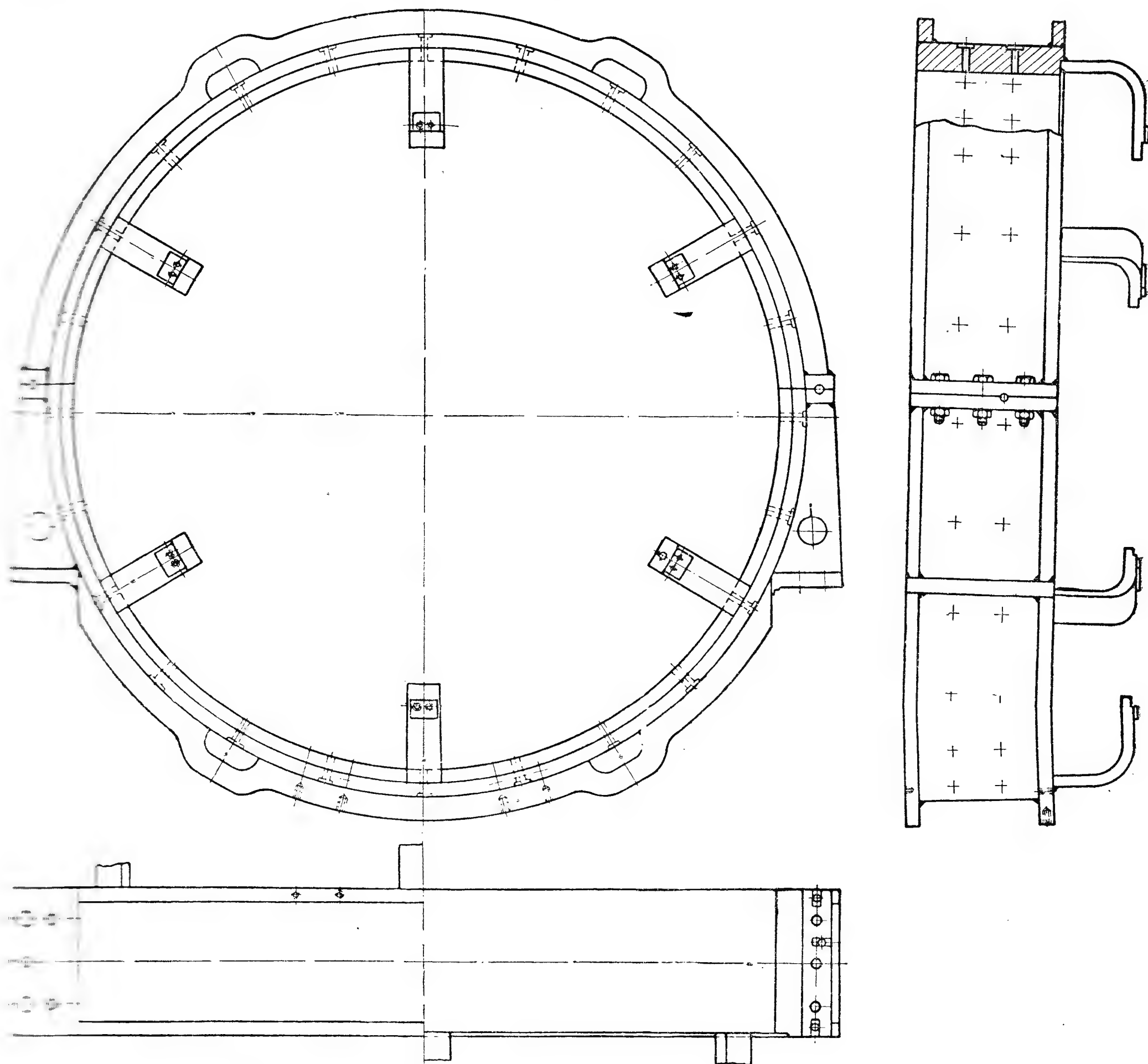
одно, два или три ребра жесткости для предупреждения прогиба ярма (фиг. 55). Иногда ребра жесткости приваривают к ярму из катаной стали (фиг. 56). С целью защиты полюсных катушек от механических повреждений размер



Фиг. 55. Литая станина с ребрами жесткости.



ярмо делают в осевом направлении машины возможно большим. Эта защита достигается также посредством прикрепляемых к ярму щитов, которые делают для обеспечения вентиляции с отверстиями, если по заданию не требуется, чтобы машина была закрытой. В небольших и средних машинах упомянутые щиты используются также для укрепления подшипников, тогда их называют подшипниковыми щитами.



Фиг. 56. Станина с приваренными ребрами жесткости.

При литом ярме последнее отливается вместе с лапами, при помощи которых машина устанавливается на фундаментную плиту; у ярма, сваренного из листового листа, лапы привариваются к ярму.

Для облегчения перевозки ярмо крупных машин делается разъемным; то же ярмо делают разъемным и у средних по величине машин для облегчения сборки и ремонта машины. Стык двух половин ярма делают по горизонтальному диаметру, при этом основные полюсы должны быть так размещены, чтобы стык приходился между ними. При наличии добавочных полюсов плоскость раздела ярма располагают несколько выше горизонтальной плоскости, проходящей через ось машины, чтобы обеспечить надлежащее соприкосновение с ярмом сердечников добавочных полюсов. Соединение обеих половин ярма делают при помощи болтов, проходящих через фланцы. Для облегчения разборных сборок в стыках ярма и в лапах должны быть, кроме крепительных

болтов, свободно входящих в приготовленные для них отверстия, еще так называемые *установочные*, точно пригнанные *штифты*.

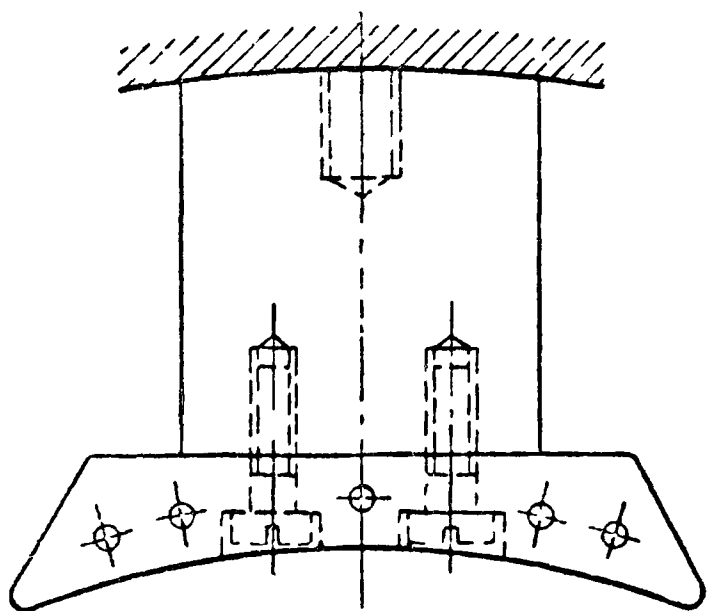
Ярмо небольших машин с подшипниковыми щитами устанавливают обычно на так называемые *салазки*, состоящие из балочек. Раньше они отливались вместе с приливами для крепления к полу, ныне салазки делают сварными.

Ярмо крупных машин устанавливают на специальные *фундаментные плиты* (см. фиг. 25).

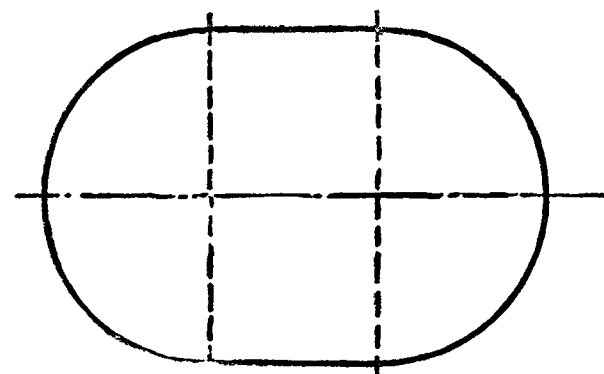
Ярмо снабжают одним или двумя кольцами с нарезкой, которые ввинчиваются в ярмо; эти кольца называют *рымами*. При наличии ребер жесткости рымы заменяют отверстиями в ребрах (фиг. 56).

## 42. Основные магнитные полюсы и их катушки

а) *Основной магнитный полюс* машины состоит из сердечника и части, уширенной в сторону зазора и носящей название *полюсного наконечника* или *полюсного башмака*. Последнее название произошло от той башмакообразной формы, которую придавали полюсному наконечнику в старых конструкциях машин постоянного тока,



Фиг. 57. Литой полюсный сердечник с прикрепленным к нему полюсным башмаком.



Фиг. 58. Сечение полюса из двух полуокружностей со вставкой между ними.

стремясь улучшить распределение магнитной индукции в зазоре при нагрузке машины, чего ныне не делают.

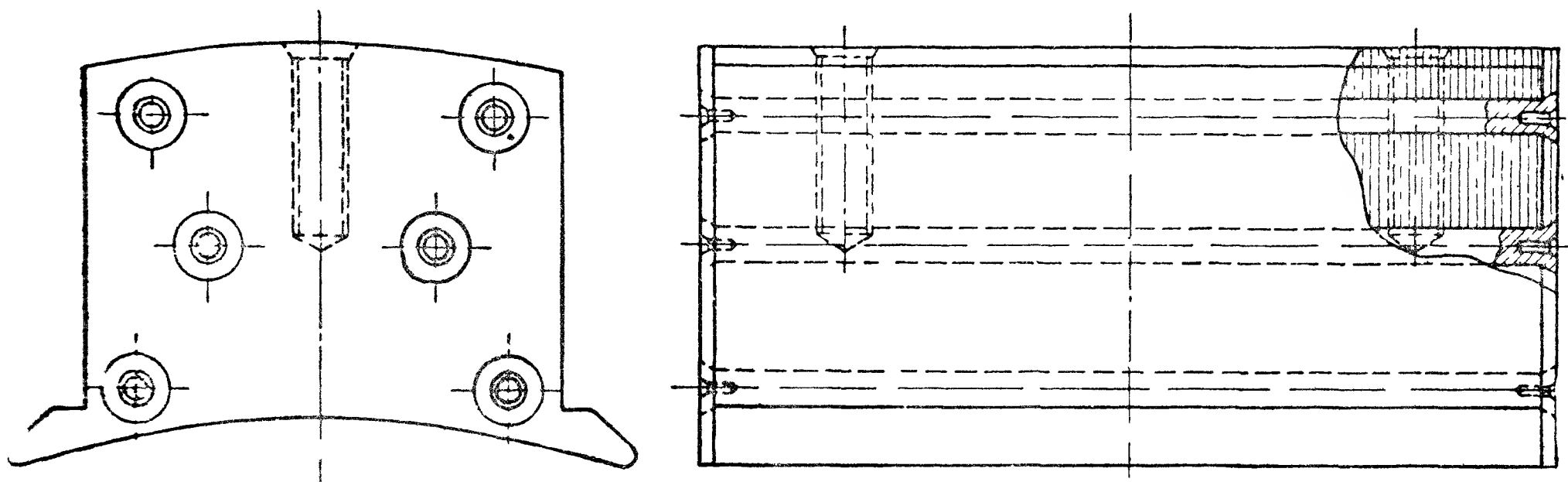
Полюсные сердечники раньше делали из литой стали. К ним прикреплялись полюсные башмаки, составленные из листовой электротехнической стали для уменьшения в них потерь на вихревые токи вследствие пульсации в зазоре (из-за зубчатости якоря) магнитного потока основных полюсов. Такие полюсные башмаки собирались на заклепках и крепились затем к литому сердечнику при помощи винтов (фиг. 57). При этом сечению полюсного сердечника стремились придать (поскольку этому не препятствуют другие размеры машины) круглую форму, так как тогда при заданной площади сечения сердечника получается наименьшая длина периметра сечения, а следовательно, и наименьшая длина проволоки на изготовление катушки полюсов (обмотки возбуждения).

Преимуществом прямоугольного сечения сердечника является меньший размер сердечника в направлении окружности якоря, что существенно в небольших машинах с добавочными полюсами, в которых бывают затруднения в размещении обмоток добавочных полюсов. Промежуточным решением является сечение, составленное из двух полуокружностей круга с прямоугольной вставкой между ними (фиг. 58)

Ныне полюсные сердечники машин постоянного тока делают, как правило, слоистыми, — штампуют из листовой стали (марки Ст-1 или Ст-3) толщиной в 1 или 1,5 мм вместе с полюсными башмаками, что гарантирует от раковин и шлаковых включений, которые могут быть в литых сердечниках и могут

привести к значительному уменьшению магнитной проводимости сердечника. Стальные сердечники спрессовывают под давлением до  $20 \text{ кг/см}^2$  и склепывают посредством заклепок впотай. Торцевые нажимные плиты сердечников делают из катаного материала толщиной 5—10 мм, смотря по величине сердечника (фиг. 59) или (у небольших машин) из нескольких листов толщиной 1—1,5 мм, сваренных между собой точечной сваркой.

Для образования хорошего контакта с ярмом, очертание полюса в сторону ярма делают по тому же радиусу, что и внутреннюю обработанную поверхность ярма. В стыке прокладывается несколько стальных листовых прокладок, чтобы имелась возможность, в случае надобности, регулировать зазор со стороны ярма.



Фиг. 59 Современный полюсный сердечник с полюсным башмаком.

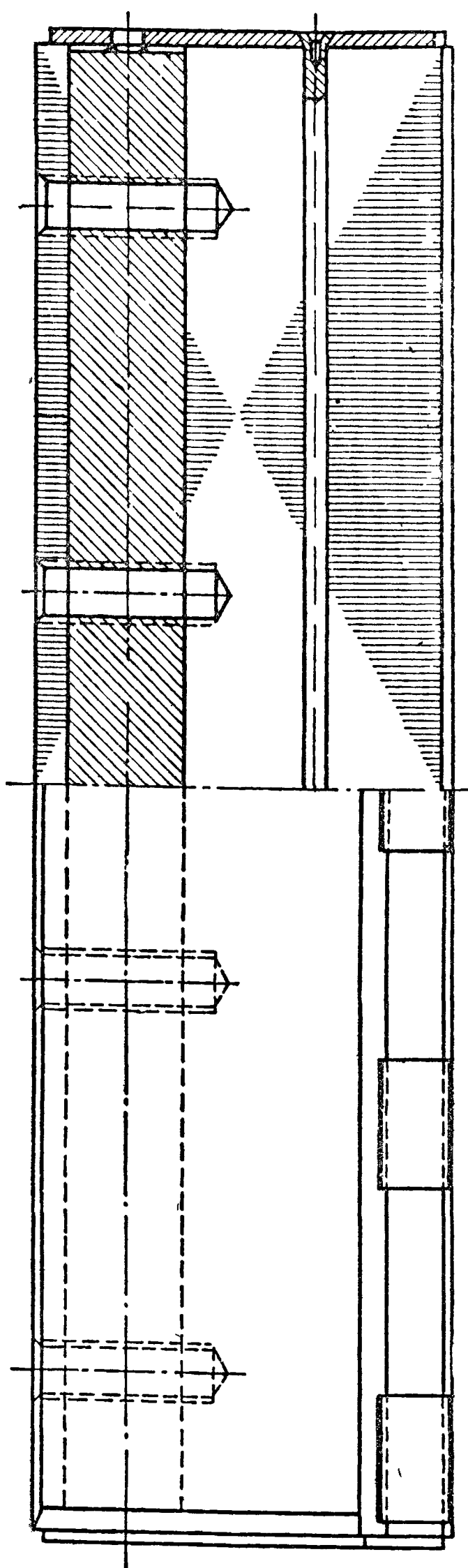
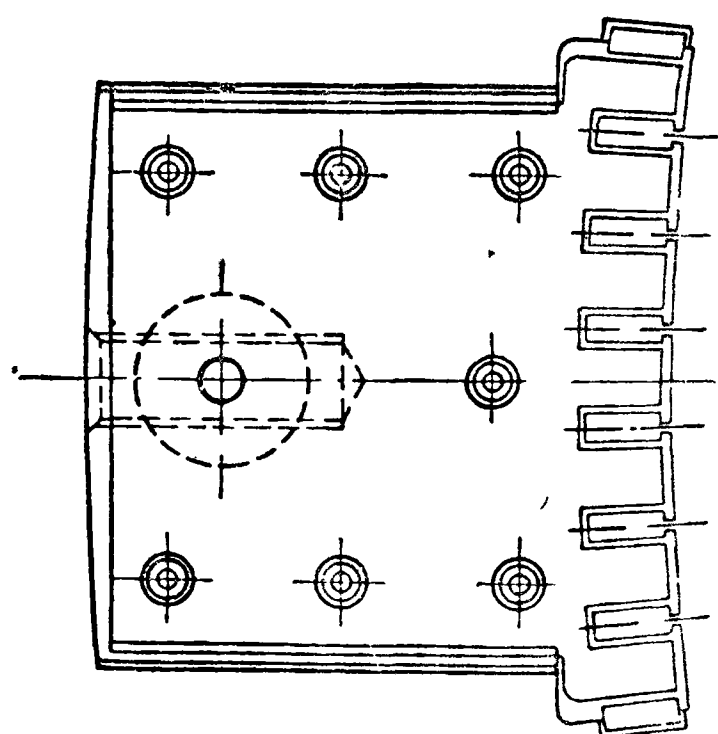
Полюсные сердечники крепят к ярму посредством одного или нескольких болтов (в зависимости от размеров сердечника), расположенных друг за другом в направлении оси машины. При хорошо спрессованных листовых полюсах отверстия для этих болтов можно нарезать непосредственно в сердечниках полюсов. В случае больших машин, однако, обычно проштамповывают в полюсных сердечниках специальные отверстия (фиг. 60), в которые закладывают массивные стержни круглого или прямоугольного сечения, в которых и нарезают отверстия для крепежных болтов.

Полюсным башмакам придают такую форму, чтобы распределение магнитной индукции имело наиболее благоприятную форму для обеспечения хорошей коммутации машины. Ныне, как правило, полюсные башмаки делают совершенно симметричными относительно середины полюсов с увеличивающимся зазором от середины к краям, для чего очертание полюсного башмака делают дугу по дуге эксцентричного круга большего диаметра, нежели наружный диаметр ярма, или делают скосы краев башмаков.

б) О б м о т к а в о з б у ж д е н и я, устраиваемая на основных полюсах машин постоянного тока, выполняется в виде катушек, которые изготавливаются вне машины, а затем надеваются на полюсные сердечники при сборке машины.

В небольших машинах с параллельным возбуждением полюсные катушки навивают на шаблонную оправку, затем, сняв с оправки и обмотав, для прочности, лентой или бечевкой, надевают на сердечник, предварительно оклеенный изоляцией толщиной 2—3 мм из прессшпана или лакобумаги. При этом катушкам придают окончательную форму (используя имеющееся место) лишь после надевания на сердечник.

В средних и больших машинах катушкам сразу придают окончательную форму на шаблоне. Намотка катушек на шаблоне с последующей изолировкой лентами является наиболее распространенной и обеспечивает непрерывную изоляцию катушки. Однако ручная изолировка катушки является довольно трудоемкой операцией. Для предохранения изоляции катушки от истирания



Фиг. 60. Полюсный сердечник с пазами для компенсационной обмотки

внутри катушки вкладывается каркас из прессшпана или тонкой листовой стали, концы которого отгибаются на верхнее и нижнее основания катушки [Л. 12].

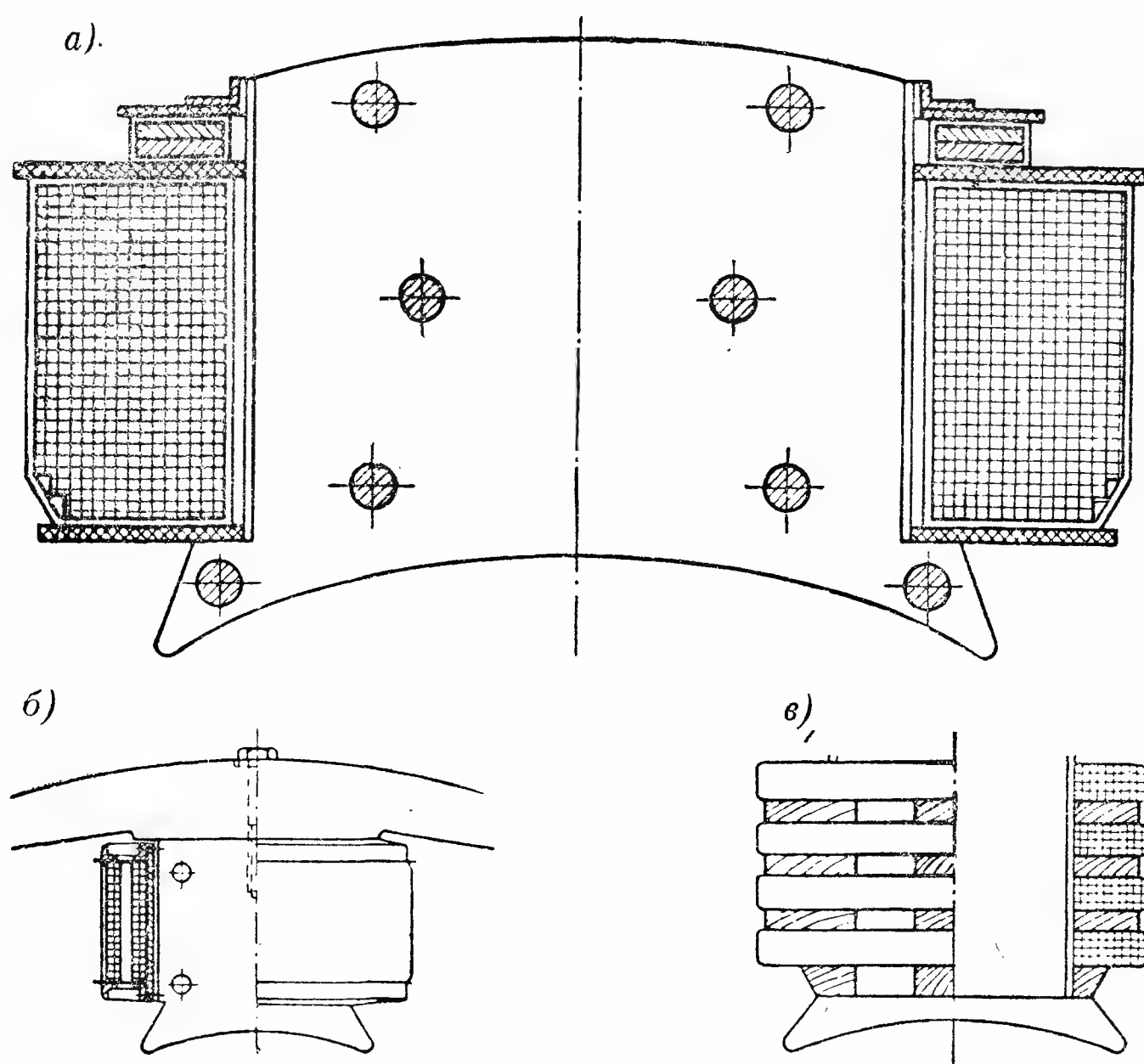
Чтобы температура внутренних слоев катушек не слишком отличалась от температуры наружных слоев, толщину катушки обычно берут в пределах 4—5 см. При больших толщинах катушек для лучшего охлаждения разбивают их по ширине или по высоте на несколько частей, между которыми образуют воздушные каналы, устраивая их при помощи деревянных распорок. Соответственно устройству воздушных каналов различают: сплошные катушки (без каналов, фиг. 61, а), трубчатые катушки (с продольными — по направлению оси полюса — воздушными каналами, фиг. 61, б), дисковые катушки (с поперечными воздушными каналами, фиг. 61, в). Трубчатые катушки делают при радиальной вентиляции, дисковые — при аксиальной вентиляции.

В небольших машинах с параллельным возбуждением сечение провода обмотки возбуждения мало. При круглом сечении диаметром до 1,5 мм обмотка делается из эмалированного провода, иногда эмалированный провод покрывают хлопчатобумажной оплеткой. При больших круглых сечениях, вплоть до 4 мм диаметром, применяют провод с хлопчатобумажной изоляцией, чаще всего марки ПБД. При еще больших сечениях переходят к прямоугольному проводу с хлопчатобумажной изоляцией, марки ПБД. Намотка прямоугольных проводов производится либо на длинную сторону, либо на короткую сторону.

В сечении катушки часто имеют трапецевидную форму, расширяющуюся в сторону ярма, для лучшего использования имеющегося места.

Последовательные обмотки возбуждения небольших машин постоянного тока делают из провода круглого или прямоугольного сечения с хлопчатобумажной изоляцией, марки ПБД; при больших сечениях провода обмотку часто делают из голого провода прямоугольного сечения, навиваемого на тонкое ребро. Между отдельными витками тогда прокладывают изоляцию из прессшпана или асбеста толщиной 0,5 или 1,0 мм. В машинах смешанного возбуждения последовательная обмотка укладывается либо поверх параллельной обмотки с соответствующим разделительным вентиляционным каналом между ними, либо надевается на сердечник полюсов выше или ниже параллельной обмотки возбуждения.





Фиг. 61. Различные формы полюсных катушек: *a* — сплошные катушки; *б* — трубчатые катушки; *в* — дисковые катушки.

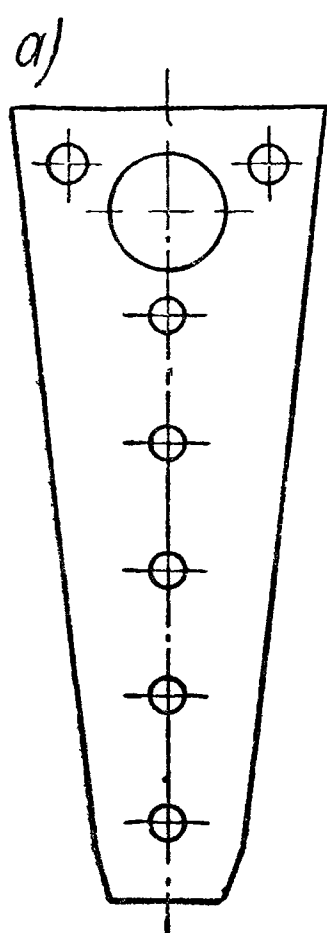
#### 43. Добавочные, или коммутационные, магнитные полюсы и их катушки

**а) Сердечники добавочных полюсов.** Так как при коммутации секции обмотки якоря проходят при вращении небольшую якорную дугу, и требуемая индукция невелика, то поперечное сечение добавочных полюсов, по сравнению с сечением основных полюсов, очень невелико. Их делают обычно из листовой или катаной стали; лишь для машин с быстро меняющейся нагрузкой прибегают к слоистым добавочным полюсам, чтобы при быстром изменении потока добавочных полюсов в них не индуктировались вихревые токи, препятствующие такому изменению. В больших машинах сечение добавочных полюсов делают либо плавно (фиг. 62, *a*), либо ступенькой (фиг. 62, *б*) уширяющимся в сторону ярма как с целью уменьшения в этой части индукции, так и для придания добавочным полюсам большей жесткости.

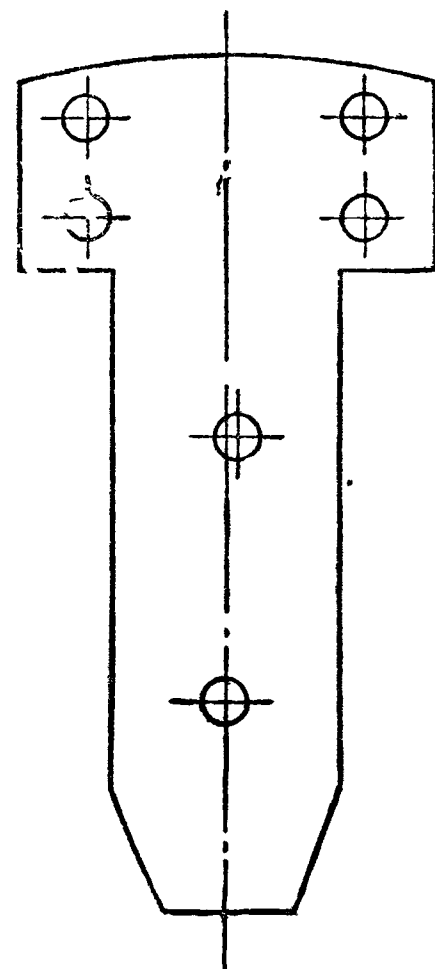
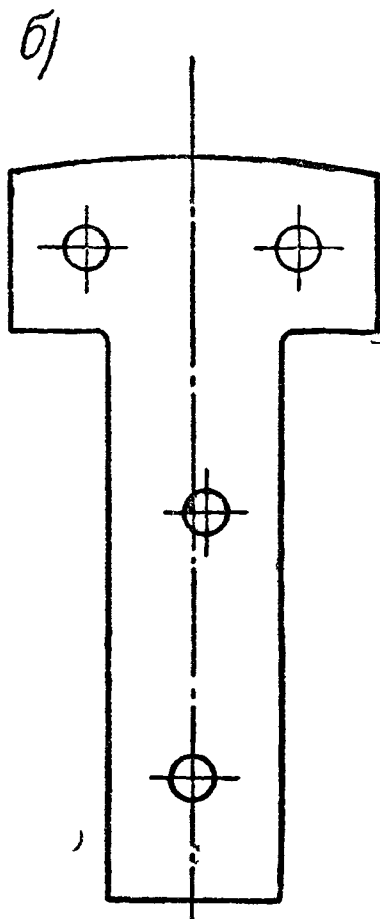
Число добавочных полюсов, как правило, равно числу основных полюсов; только для маленьких машин число их иногда в два раза меньше. Длина добавочных полюсов (размер в направлении оси машины) больших машин такая же, как и у основных магнитных полюсов, длина небольших машин — меньше, до половины длины якоря. Размер добавочного полюса по радиусу ярма называется его высотой.

Необходимое распределение поля под добавочным полюсом достигается либо применением соответствующего наконечника (башмака), либо скосами дуга добавочного полюса со стороны якоря (фиг. 63). Крепление к ярму делается так же, как и основных полюсов, одним или двумя болтами. В месте стыка с ярмом подкладывают несколько листовых стальных прокладок для обеспечения возможности при сборке машины подрегулировать нужный зазор под добавочным полюсом, который, как правило, всегда больше, чем под основным полюсом, и окончательно устанавливается для больших машин при наладке коммутации перед выпуском машины с завода.

Для уменьшения рассеяния добавочных полюсов желательно, если возможно, разместить обмотку их как можно ближе к якорю. В нижней части у якоря, катушка добавочного полюса удерживается полюсным башмаком добавочного полюса; если он для этого недостаточен или его нет, то применяю-



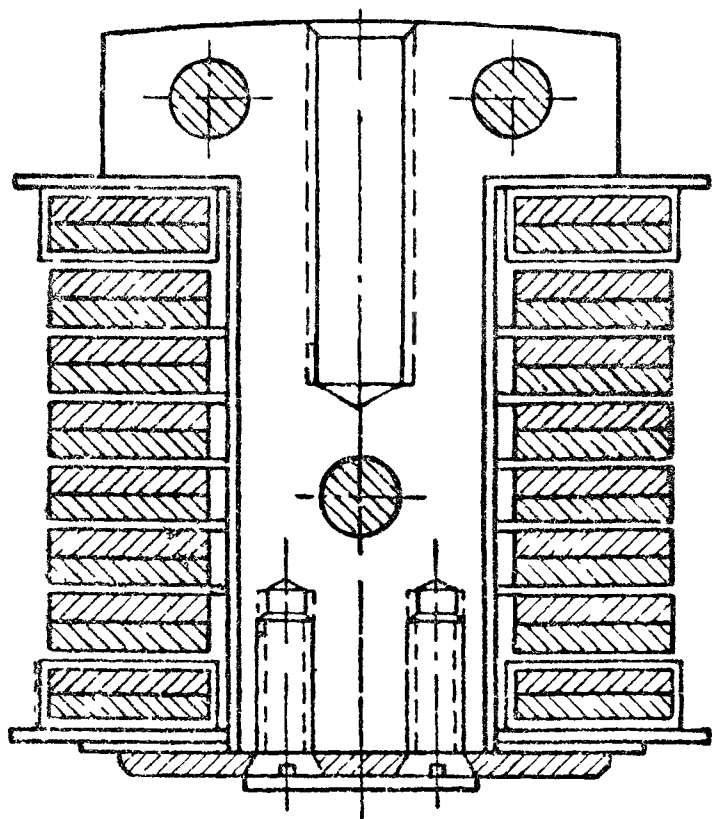
Фиг. 62. Сердечники добавочных полюсов.



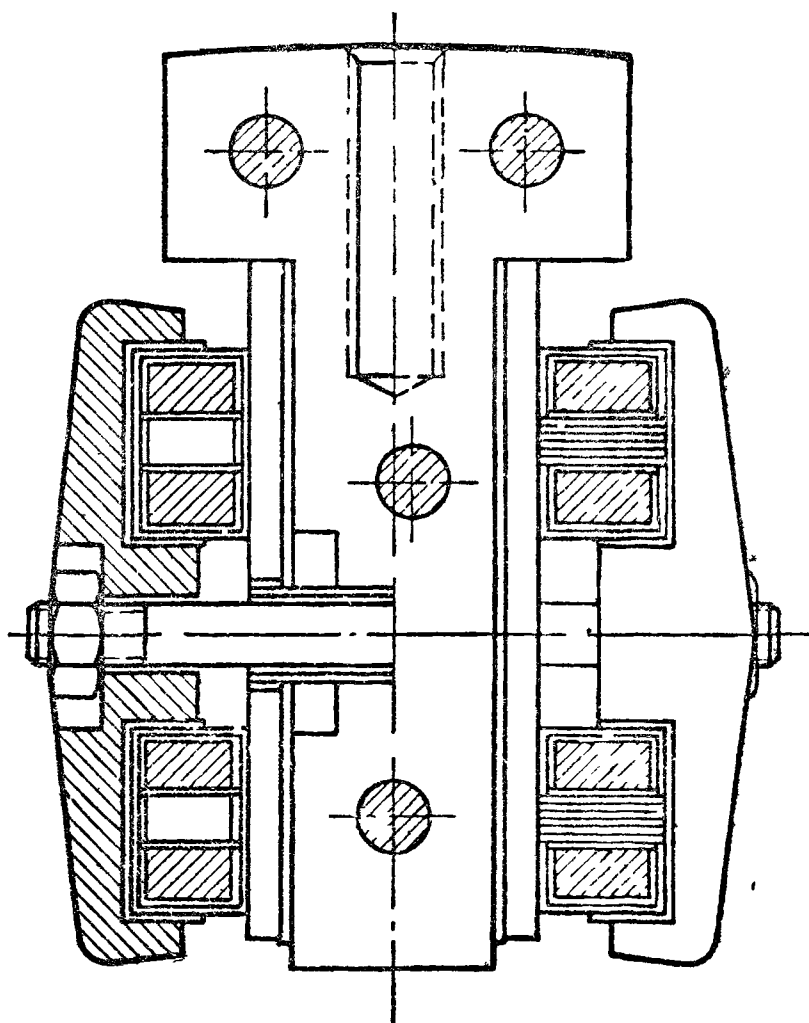
Фиг. 63. Добавочный полюс со скосами торца со стороны якоря.

медную пластину, прикрепленную к добавочному полюсу (фиг. 64). Если требуется быстрое изменение магнитного потока добавочного полюса, то такой пластины, однако, избегают.

Чтобы обмотка не сдвигалась по высоте добавочного полюса, ее закрепляют в машинах средней мощности штифтом, пропущенным через полюс (фиг. 65). При сердечниках, уширяющихся в сторону ярма ступенчато, катушка удерживается в нуж-



Фиг. 64. Крепление обмотки добавочного полюса помощью пластины.



Фиг. 65. Закрепление обмотки на добавочном полюсе при помощи скоб.

ном положении заплечиком, получающимся в этом случае на сердечнике добавочного полюса.

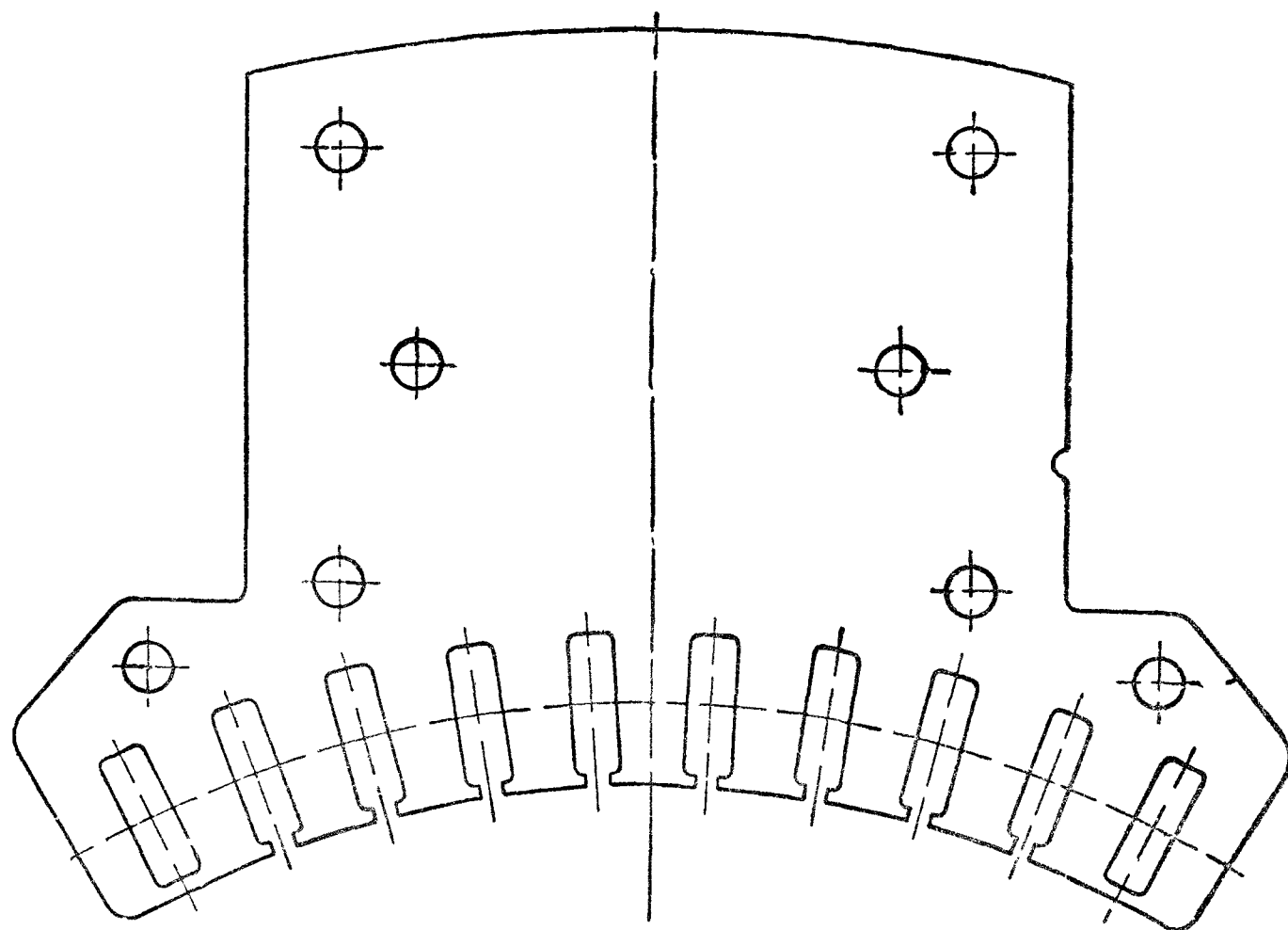
б) По обмотке добавочных полюсов машины постоянного тока, включаемой в цепь якоря последовательно, проходит ток якоря. Поэтому сечение обмотки получается большим, а число витков — небольшим, в особенности, если машина, кроме добавочных полюсов, снабжена компенсационной обмоткой,

которая берет на себя часть функций обмотки добавочных полюсов. По этой причине лишь в небольших машинах, в особенности на повышенное напряжение (до 440 в), обмотка добавочных полюсов может быть сделана из круглого или прямоугольного проводника с хлопчатобумажной изоляцией; ее изготовляют на оправке и после надевают на сердечник добавочного полюса, оклеенный прессшпаном или лакобумагой толщиной в 2—3 мм.

При больших сечениях обмотки добавочных полюсов, ее делают из голой медной шины, навитой в виде спирали на узкое ребро, с промежутками между витками, изолируя обмотку слоем прессшпана или лакобумаги от сердечника полюсов и по концам и делая изоляционные прокладки между витками.

#### 44. Компенсационная обмотка

Изолированные проводники компенсационной обмотки укладывают в пазы полюсных башмаков главных полюсов в один или в два слоя, обмотку соединяют последовательно с обмоткой якоря, а потому по ней проходит полный



Фиг. 66. Лист главного полюса с пазами для компенсационной обмотки.

ток машины, как и по обмотке добавочных полюсов. Вследствие этого пазы для компенсационной обмотки получают значительные размеры, и полюсный башмак принимает вид, сильно отличающийся от обычного (т. е. имеющегося в машинах без компенсационной обмотки), как это показано на фиг. 66. Иногда по краям полюсного башмака делают полупазы, что позволяет при той же ширине башмака иметь больше места для укладки проводников компенсационной обмотки. Изоляцию обмотки от стенок пазов полюсных башмаков делают так же, как и изоляцию якорной обмотки от стенок якорных пазов.

---

---

## ГЛАВА II

### ГЛАВНАЯ МАГНИТНАЯ ЦЕПЬ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ ХОЛОСТОМ ХОДЕ

#### А. ОБОСНОВАНИЯ РАСЧЕТА ГЛАВНОЙ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

##### 45. Вводные замечания

Расчет машины постоянного тока начинается с определения основных размеров якоря и расчета якорной обмотки, из которого выясняется величина необходимого при холостом ходе машины магнитного потока  $\Phi_a$ , входящего в якорь.

Этот магнитный поток мы будем называть основным, или главным, магнитным потоком, а путь, по которому он замыкается, главной магнитной цепью машины, в отличие от магнитной цепи добавочных полюсов и других, о которых речь будет дальше. Научные основы расчета магнитной цепи были заложены выдающимся русским физиком А. Г. Столетовым в 1872 г. в его докторской диссертации «Исследование о функции намагничивания мягкого железа». В этой работе А. Г. Столетов впервые установил связь между намагничивающей силой и индукцией.

Позднее, в 1886 г., братьями Гопкинсонами была разработана практическая методика расчета магнитной цепи. Она выяснила ошибочность многих ранее предлагавшихся конструкций главной магнитной цепи и привела к началу 90 гг. прошлого столетия к ныне общепринятой конструкции, состоящей из кольцеобразного ярма,<sup>1</sup> примерно прямоугольного сечения, и прикрепленных к нему с внутренней стороны сердечников полюсов с полюсными башмаками.

Между башмаками и цилиндрической зубчатой поверхностью якоря имеется определенный промежуток  $\delta$  (см. фиг. 72), называемый зазором; через зазор и через якорь замыкается основной магнитный поток. На фиг. 72 пунктиром показан средний путь основного магнитного потока.

При расчете якоря и индуцируемой в его обмотке э. д. с. важно знать распределение индукции основного магнитного потока в зазоре машины, поэтому изложение теории машины постоянного тока целесообразно начинать с изложения расчета главной магнитной цепи, предполагая известной величину магнитного потока  $\Phi_a$ , входящего в якорь. При этом, рассчитывая главную магнитную цепь машины при холостом ходе, мы первоначально не будем обращать внимания на наличие добавочных полюсов (иначе говоря, будем производить расчет главной магнитной цепи машины, не имеющей добавочных полюсов), так как при холостом ходе машины их влияние практически не сказывается на расчете главной магнитной цепи. Точно так же будем предполагать, что машина не компенсирована, т. е. не имеет компенсационной обмотки, а следовательно, и необходимых для ее укладки пазов в полюсных башмаках основных полюсов.

---

<sup>1</sup> Иногда из-за недостатка места делают ярмо в виде многоугольника.



Пазы якоря будем предполагать простой прямоугольной формы, т. е. не учитывать вырезов для клиньев, — если против центробежной силы башмака якоря удерживается клиньями, а также вырезов для размещения на нем бандажей, — если обмотка удерживается в пазах бандажами.

Расчет главной магнитной цепи при холостом ходе машины производится, существу, совершенно одинаково как для генераторного, так и для двигательного режима работы, но ради определенности будем иметь в виду генераторный холостой ход; после сделаем соответствующие пояснения о применении того же расчета к двигательному режиму при холостом ходе.

Расчет главной магнитной цепи сводится к вычислению намагничивающей силы обмотки возбуждения главных магнитных полюсов, необходимой для создания заданного магнитного потока  $\Phi_a$ ; при этом предполагается, что дело с машиной независимого возбуждения. Расчет ведется на основе закона магнитной цепи, который мы вкратце напомним, так же как и другие законы и положения, которые нужно возобновить в памяти в данном случае.

#### 46. Закон преломления магнитных линий

При прохождении магнитного потока из среды с магнитной проницаемостью  $\mu_1$  в среду с магнитной проницаемостью  $\mu_2$  магнитные линии испытывают преломление согласно следующему закону (фиг. 67):

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2}, \quad (1)$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — углы, образуемые магнитной линией с нормалью к поверхности раздела сред.

Если магнитные линии выходят из ферромагнитной среды, для которой  $\mu_1$  велико, в воздух, для которого  $\mu_2 = 1$ , то даже при больших значениях  $\alpha_1$ , приближающихся к  $90^\circ$ , угол  $\alpha_2$  будет очень мал.

В самом деле, если индукция в ферромагнитной среде (стали)  $B = 15\,000$  гс, то ей соответствует  $\mu_1 = 975$ . Взяв  $\alpha_1 = 80^\circ$ , имеем из (1):

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \operatorname{tg} \alpha_1 \frac{\mu_2}{\mu_1} = 5,67 \times \frac{1}{975} = 5,82 \times 10^{-3}$$

Отсюда

$$\alpha_2 = \operatorname{arctg} 5,82 \cdot 10^{-3} = 0^\circ 20'.$$

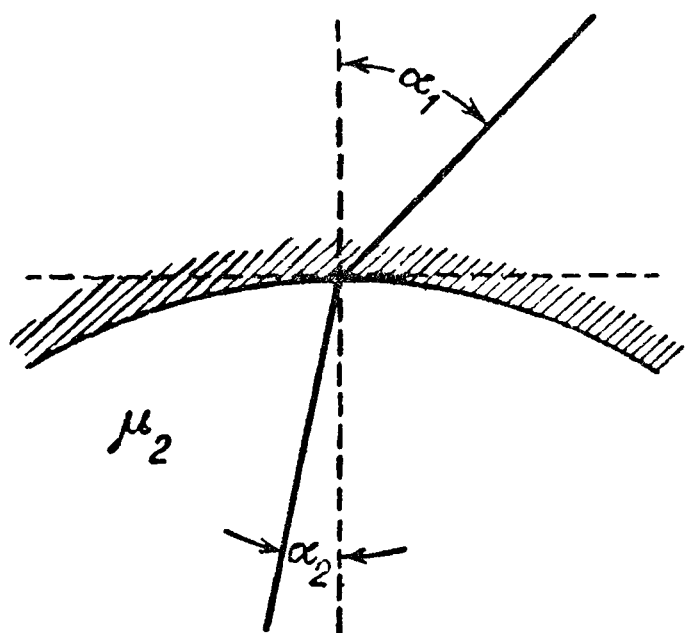
Ввиду этого в дальнейшем будем принимать, что магнитные линии пересекают поверхности, ограничивающие зазор машины (поверхности полюсного башмака и якоря), под прямыми углами.

#### 47. Связь между направлением тока и направлением создаваемых им магнитных линий

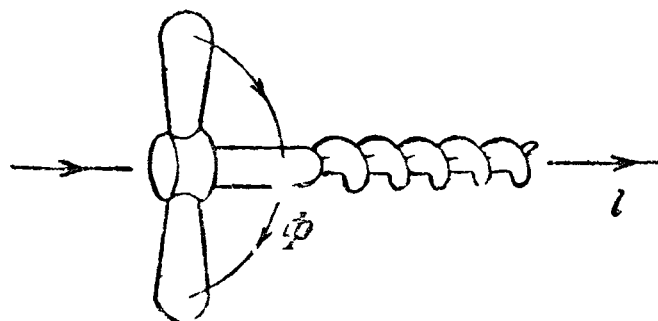
Эта связь устанавливается нижеследующим правилом штопора.

Если представить себе штопор с правой нарезкой, ввинчиваемый в направлении тока, то направление вращения винта определит собой направление окружающих проводник магнитных линий (фиг. 68).

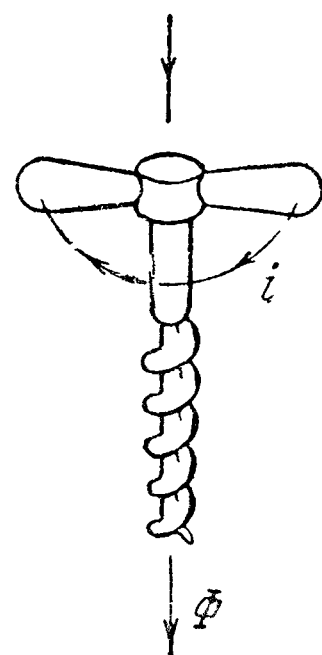
Тем же штопором можно пользоваться и для обратной цели, а именно, для определения направления тока в намагничивающей обмотке, если известно направление потока. Для этого нужно ввинчивать штопор с правой нарезкой в направлении потока и смотреть за направлением вращения ручки штопора, которое даст направление тока (фиг. 69).



Фиг. 67. К закону преломления магнитных линий



Фиг. 68. К правилу штопора с правой нарезкой для определения направления магнитных линий вокруг проводника с током.

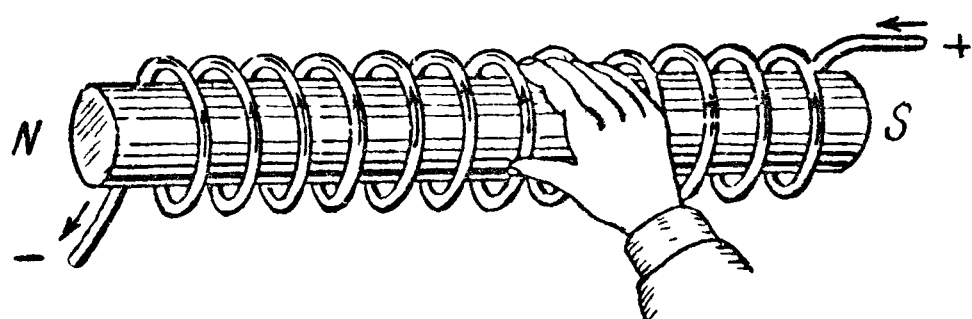


Фиг. 69. К правилу штопора с правой нарезкой для определения направления тока по направлению магнитных линий.

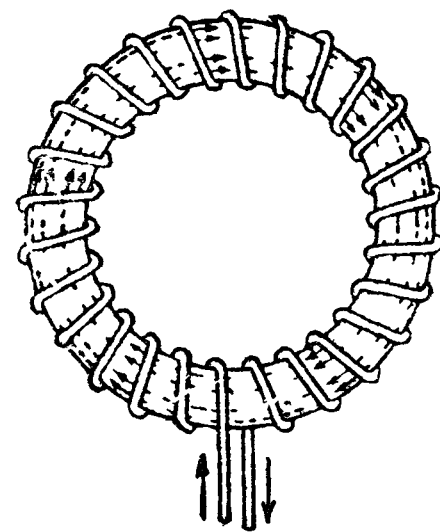
В случае электромагнитов (например, намагничивающие полюсные катушки) значительно удобнее пользоваться следующим правилом правой руки: кладут ладонь правой руки на катушку электромагнита так, чтобы указательный палец указывал направление тока в обмотке катушки, тогда большой палец, отогнутый под прямым углом, даст направление создаваемого обмоткой магнитного потока (фиг. 70).

#### 48. Закон магнитной цепи

Рассмотрим простейшую однородную магнитную цепь, например железное кольцо с одинаковым по всей длине круглым сечением (так называемый тороид), фиг. 71. Для получения в таком кольце потока заданной величины  $\Phi$  необходимо создать намагничивающую силу  $F$  (в дальнейшем, сокращенно, н. с.), которая по закону магнитной цепи находится в таком же



Фиг. 70. К правилу правой руки для определения по направлению тока направления магнитных линий



Фиг. 71. Простейшая замкнутая магнитная цепь.

соотношении с потоком  $\Phi$  и магнитным сопротивлением  $\mathfrak{R}$  пути, по которому проходит поток  $\Phi$ , в каком находятся э. д. с.  $E$ , ток  $I$  и сопротивление  $R$ . В последнем случае, по закону Ома, имеем:  $E = IR$ .

Для магнитной цепи, таким образом, можем написать:<sup>1</sup>

$$F = \Phi \mathfrak{R}. \quad (2)$$

М. д. с.  $F$  пропорциональна числу ампервитков намагничивающей обмотки и выражается формулой:

$$F = 0,4 \pi i \omega. \quad (3)$$

<sup>1</sup> Магнитное сопротивление обозначаем через  $\mathfrak{R}$ , чтобы не смешивать его с эл. сопротивлением, обозначаемым буквой  $R$ .

Здесь ток  $i$  предполагается выраженным в амперах, а  $w$  — число витков. **Та же м. д. с.  $F$**  может быть получена при любом другом числе витков  $w$  и соответствующем ему токе  $i$ ; необходимо лишь, чтобы произведение  $iw$  оставалось **тем же**, поэтому целесообразно ввести для ампервитков особое обозначение:

$$i \cdot w = AW, \quad (4)$$

Подставляя это в (3), имеем:

$$F = 0,4 \pi \cdot AW. \quad (3a)$$

Магнитное сопротивление  $\mathfrak{R}$  подсчитывается по формуле, аналогичной для эл. сопротивления проводника постоянному току; для последнего имеем:

$$R = \frac{l}{\lambda s},$$

где  $l$  — длина проводника,  $s$  — сечение проводника, а  $\lambda$  — удельная электрическая проводимость для материала, из которого сделан проводник.

Для магнитной цепи имеем:

$$\mathfrak{R} = \frac{L}{\mu S}. \quad (5)$$

Здесь  $L$  — длина пути, по которому проходит поток  $\Phi$ , а  $S$  — площадь сечения пути магнитного потока;  $\mu$  — так называемая магнитная проницаемость, характеризующая собой магнитные свойства материала, из которого сделана магнитная цепь.

Подставляя (5) в (2), получаем:

$$F = \Phi \mathfrak{R} = \Phi \frac{L}{\mu S}. \quad (6)$$

Упомянутая аналогия между законом магнитной цепи и законом Ома для электрической цепи постоянного тока является лишь формальной вследствие разницы между электрической проводимостью  $\lambda$  и магнитной проницаемостью  $\mu$ . В то время как при неизменной температуре эл. проводимость  $\lambda$  проводника определяется всецело его материалом, магнитная проницаемость  $\mu$  при заданном сечении магнитной цепи зависит не только от материала, из которого она сделана, но и от величины магнитного потока, проходящего по ней.

Так как

$$\frac{\Phi}{S} = B,$$

где  $B$  — магнитная индукция, то фактически получаем зависимость  $\mu$  от  $B$ :

$$\mu = f(B),$$

поэтому (6) можно переписать так:

$$F = \frac{\Phi}{S \mu} L = \frac{B}{\mu} L = \frac{B}{f(B)} L. \quad (7)$$

Таким образом, н. с., необходимая для создания определенной индукции, может быть найдена лишь в том случае, если для материала, из которого сделана магнитная цепь, известна зависимость  $\mu = f(B)$ . Эта зависимость может быть определена для любого ферромагнитного материала опытным путем. Практически, однако, удобнее пользоваться не кривыми  $\mu = f(B)$ , кривыми магнитной проницаемости, а кривыми намагничения  $B = f(H)$ , дающими связь между магнитной индукцией  $B$  и напряженностью магнитного поля  $H$ .

Так как

$$\frac{B}{\mu} = H,$$



то формулу (7) можно переписать так:

$$F = \frac{B}{\mu} L = HL. \quad (8)$$

Задавшись, таким образом,  $B$ , находим по кривой  $B = f(H)$ , полученной опытным путем для данного материала, соответствующее значение  $H$ , а тогда по (8) можем найти  $F$ .

Практический интерес при расчете магнитной цепи представляет не

$$F = 0,4 \pi AW,$$

а число ампервитков

$$AW = \frac{F}{0,4 \pi} \approx 0,8 F.$$

Подставляя сюда (8), находим.

$$AW = 0,8 HL. \quad (9)$$

Левая часть этого равенства ( $AW$ ) дает ампервитки, следовательно, и правая ( $0,8 HL$ ) должна давать ампервитки; если  $L$  — длина пути магнитного потока в см, то, очевидно,  $0,8 H$  должно представлять собой ампервитки, необходимые для проведения заданного потока  $\Phi$  по пути длиной в 1 см. Для этих ампервитков введем специальное обозначение:

$$a\omega = 0,8 H. \quad (10)$$

Тогда можем написать вместо (9):

$$AW = a\omega L. \quad (11)$$

В практических расчетах, очевидно, удобнее пользоваться кривой:

$$B = f(0,8 H) = f(a\omega), \quad (12)$$

а не кривой  $B = f(H)$ .

Отметим, что из (10) имеем.

$$H = \frac{a\omega}{0,8} = 0,4 \pi a\omega \approx 1,257 a\omega. \quad (13)$$

Резюмируем: исходя из м. д. с., нельзя определить создаваемого ею магнитного потока; задача решается только в обратном направлении: исходя из заданного потока и определяя создаваемую им индукцию, можно найти, пользуясь кривой намагничивания, необходимую м. д. с.

#### 49. Применение закона магнитной цепи к машине постоянного тока

а) Разбивка магнитной цепи на участки. При попытке применить закон магнитной цепи к расчету магнитной цепи машины постоянного тока мы наталкиваемся на ряд затруднений, так как магнитная цепь машины имеет неодинаковые в разных частях сечения, а следовательно, и разные индукции; кроме того, отдельные участки пути потока сделаны из разного материала, а потому имеют разные кривые намагничивания.

Вследствие сказанного, для расчета магнитной цепи машины необходимо весь путь магнитного потока разбить при помощи нормальных к магнитным линиям (равнопотенциальных) поверхностей на столько отдельных участков, сколько раз по пути потока происходит либо изменение индукции  $B$  (из-за изменения площади сечения пути потока), либо изменение магнитного материала. Строгое выполнение этого требования сделало бы расчет магнитной цепи ма



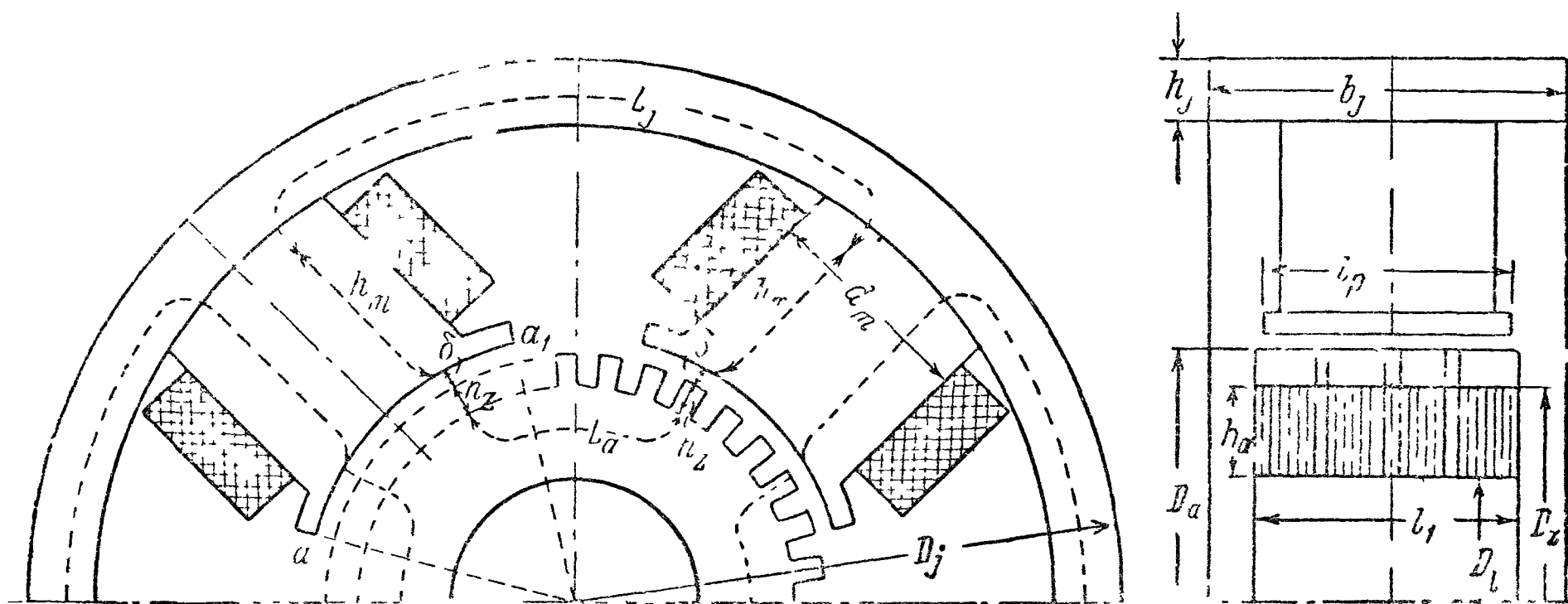
шины очень громоздким; практика показала, однако, что можно ограничиться разбивкой пути магнитного потока на сравнительно небольшое число участков, всего пять, как указано в первом столбце табл. 9 и на фиг. 72.

Таблица 9

Разбивка магнитной цепи машины постоянного тока на расчетные участки (фиг. 72)

Наименование участка пути магнитного потока	Магнитный поток	Расчетное значение сечения участка	Расчетное значение индукции на участке	Расчетное значение ампервитков на 1 см пути на участке	Длина пути по участку, см	Полные ампервитки на весь участок	Примечание
Сердечник якоря	$\Phi_a/2$	$S_a$	$B_a$	$a\omega_a$	$L_a$	$AW_a$	Сечение вер-ху зубца Сечение промежуточное Сечение внизу зубца
Слой зубцов и пазов якоря (рабочий слой)	$\Phi_a$	$S_{z1}$	$B_{z1}$	$a\omega_z$	$L_z=2h_z$	$AW_z$	
		$S_{z2}$	$B_{z2}$				
		$S_{z3}$	$B_{z3}$				
Зазор	$\Phi_a$	$S_\delta$	$B_\delta=H_\delta$	$a\omega_\delta$	$L_\delta=2\delta$	$AW_\delta$	
Сердечник полюсов и полюсный башмак	$\Phi_m$	$S_m$	$B_m$	$a\omega_m$	$L_m=2h_m$	$AW_m$	
Ярмо	$\Phi_m/2$	$S_j$	$B_j$	$a\omega_j$	$L_j$	$AW_j$	

б) Определение необходимых ампервитков. Очевидно, что фактическое распределение индукции на протяжении каждого такого участка заменяется некоторым средним.



Фиг. 72. Разбивка главной магнитной цепи машины постоянного тока на участки.

Подсчитав ампервитки  $AW_x$ , необходимые для каждого участка, складываем их и получаем то число ампервитков, которое необходимо иметь на пару полюсов машины. Если машина многополюсная, то в этом случае ее можно мыслить себе как объединение в одном ярме  $p$  двухполюсных машин; поэтому мы можем подсчитать сперва число ампервитков  $AW_k$  на одну пару полюсов, а затем, умножив их на  $p$ , получить число ампервитков  $AW_t$ , необходимых на всех полюсах:

$$AW_t = AW_k \cdot p. \quad (14)$$

Согласно тому, что сказано выше, в § 48, можем для любого участка пути магнитного потока машины написать:

$$AW_x = aw_x L_x, \quad (15)$$

а следовательно, для  $AW_k$  имеем:

$$AW_k = \sum AW_x = \sum aw_x L_x. \quad (16)$$

Здесь  $AW_x$  — ампервитки, необходимые для проведения заданного потока через данный участок магнитной цепи;  $aw_x$  — те же ампервитки, рассчитанные на 1 см пути потока на данном участке;  $L_x$  — длина данного участка.

Из табл. 9 следует, что

$$AW_k = AW_a + AW_z + AW_\delta + AW_m + AW_j. \quad (16a)$$

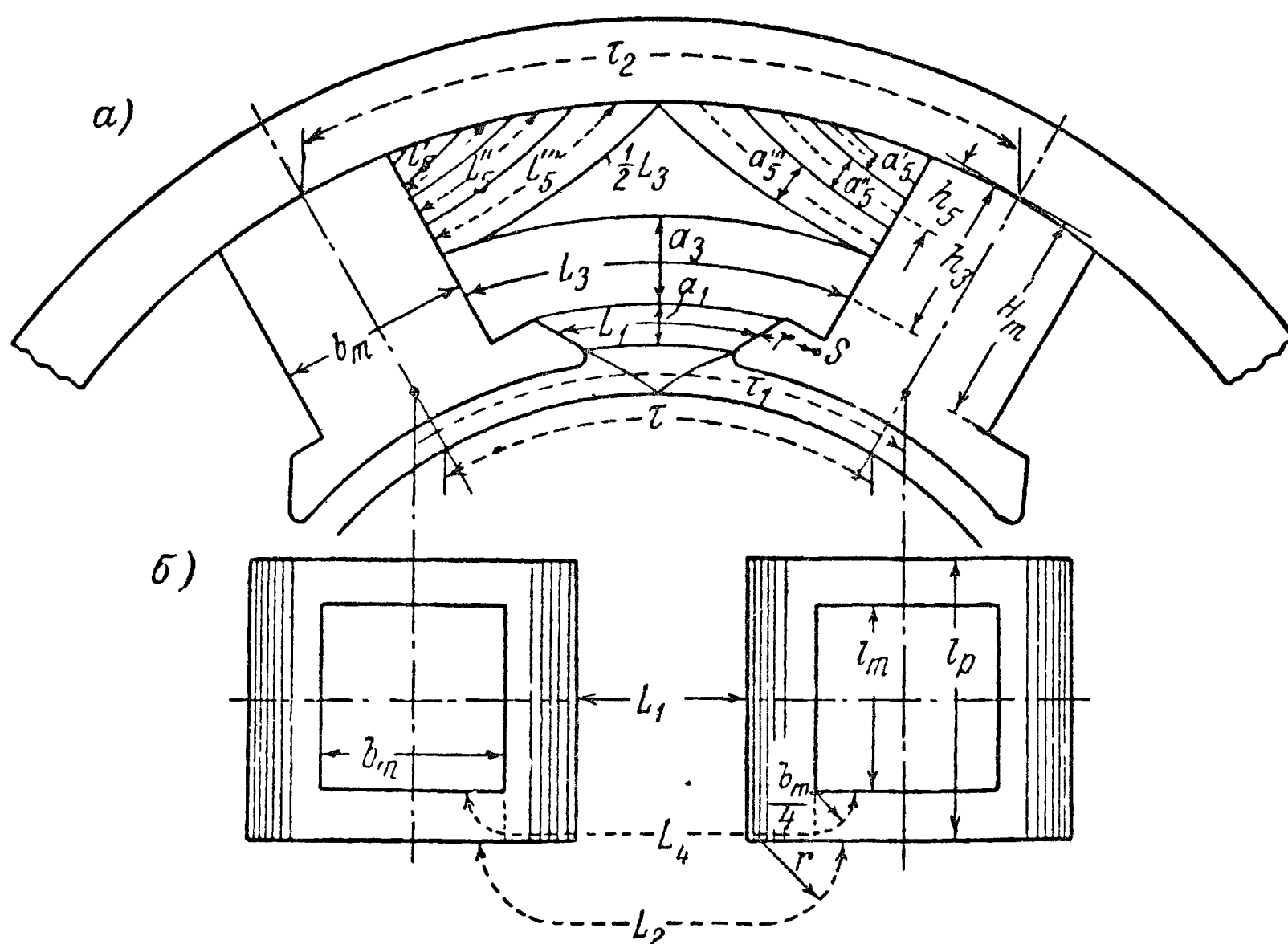
Ведя расчет для магнитного потока, необходимого для индуктирования в якорной обмотке э. д. с.  $E_{0N} = U_N$ , т. е. равной номинальному напряжению машины, будем приписывать к значениям ампервитков  $AW_x$  индекс нуль:

$$AW_{k0} = AW_{a0} + AW_{z0} + AW_{\delta 0} + AW_{m0} + AW_{j0}. \quad (16b)$$

Расчет значений ампервитков для отдельных участков магнитной цепи при холостом ходе дан дальше, в § 52—55. Расчет магнитной цепи при нагрузке машины, работающей в качестве генератора, будет дан в гл. V.

## 50. Магнитный поток полюсов и ярма

Для того чтобы в якоре при холостом ходе получить магнитный поток  $\Phi_a$ , необходимо, чтобы поток  $\Phi_m$ , входящий из ярма в полюс, был больше  $\Phi_a$ , так как часть магнитных линий потока  $\Phi_m$ , проходящих через сердечники полюсов, замыкается помимо якоря через воздух — частью от полюса к смежным полюсам, частью от полюса к ярму. Эти магнитные линии, не проходящие в якорь,



Фиг. 73. Поток рассеяния в машине постоянного тока с небольшим числом полюсов.

называются потоками магнитного рассеяния полюсов. Обозначая их сумму через  $\Phi_s$ , можем написать:

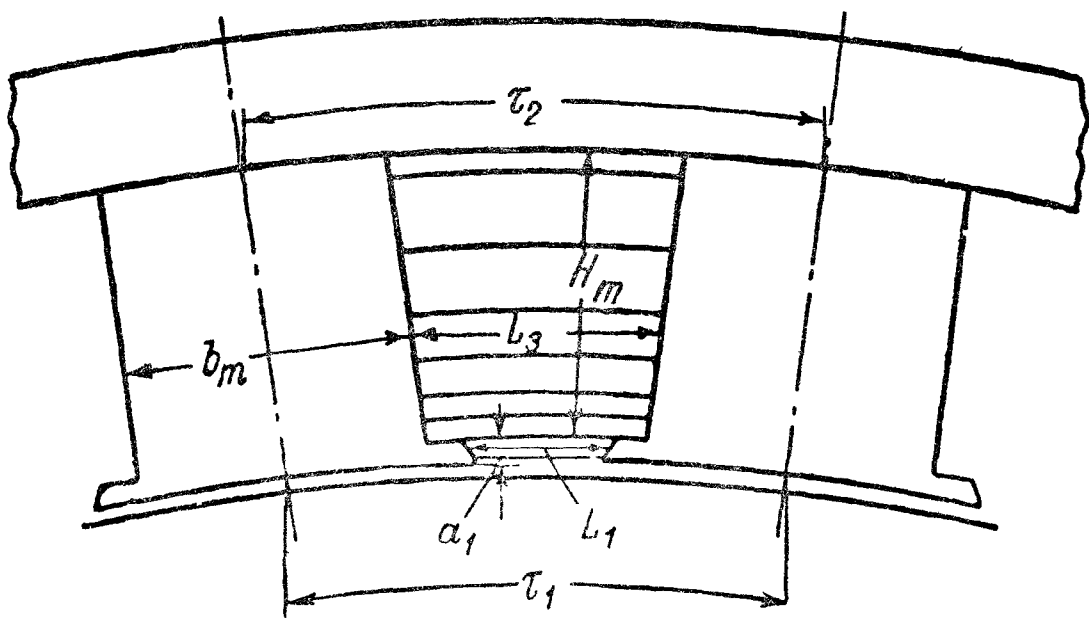
$$\Phi_m = \Phi_a + \Phi_s = \Phi_a \left( 1 + \frac{\Phi_s}{\Phi_a} \right) = \sigma \Phi_a. \quad (17)$$

Коэффициент

$$\sigma = 1 + \frac{\Phi_s}{\Phi_a} \quad (18)$$

называется коэффициентом магнитного рассеяния полюсов.

На фиг. 73 показано распределение потоков магнитного рассеяния для случая шестиполусной машины в плоскостях, перпендикулярных к оси машины. Как видим, часть потоков магнитного рассеяния замыкается через ярмо. Вследствие этого не во всех сечениях ярма будет проходить один и тот же магнитный поток, как это имеет место при большом числе полюсов (фиг. 74), когда из-за относительно небольших углов между осями полюсов нет потоков рассеяния, замыкающихся через ярмо.



Фиг. 74. Потоки рассеяния в машине постоянного тока с большим числом полюсов.

При расчете магнитной цепи мы будем считать поток в ярме одинаковым во всех сечениях и равным  $\Phi_m/2$  (при входе в ярмо  $\Phi_m$  раздваивается, фиг. 72 и 73). По высоте полюсного сердечника, включая полюсные башмаки, магнитный поток убывает от значения  $\Phi_m$  у стыка сердечника полюса с ярмом до значения  $\Phi_a$  у зазора, однако мы будем считать его неизменным по всей высоте и равным  $\Phi_m$ , что, очевидно, поведет к некоторому расчетному преувеличению ампервитков  $AW_m$ .

### 51. Построение кривой распределения магнитного потока в зазоре

Форма кривой распределения потока в зазоре зависит от конструкции полюсных башмаков. Кривая может быть построена следующими способами.

а) Первый приближенный способ. Принимается, что м. д. с., необходимая для проведения потока из полюса в гладкий якорь, имеет под полюсом постоянное значение, а затем падает по прямой линии от максимального положительного значения к равному ему максимальному отрицательному значению, как это представлено на фиг. 75 ломаной линией  $ABCDF$ . В любой точке якоря магнитному сопротивлению пути  $\overline{KM}$  (кратчайшая линия к полюсу) соответствует ордината кривой н. с.  $\overline{LM'}$ . Для точки  $M_1$ , лежащей под полюсом, пути  $K_1M_1$  магнитной линии соответствует ордината кривой м. д. с.  $\overline{L_1M_1'}$ . Мы можем, очевидно, сказать, что индукция  $B_M$  в точке  $M$  будет во столько раз меньше  $B_\delta$  в точке  $M_1$ , во сколько раз  $\overline{LM'}/\overline{KM}$  меньше  $\overline{L_1M_1'}/\overline{K_1M_1}$ , т. е. получаем выражение:

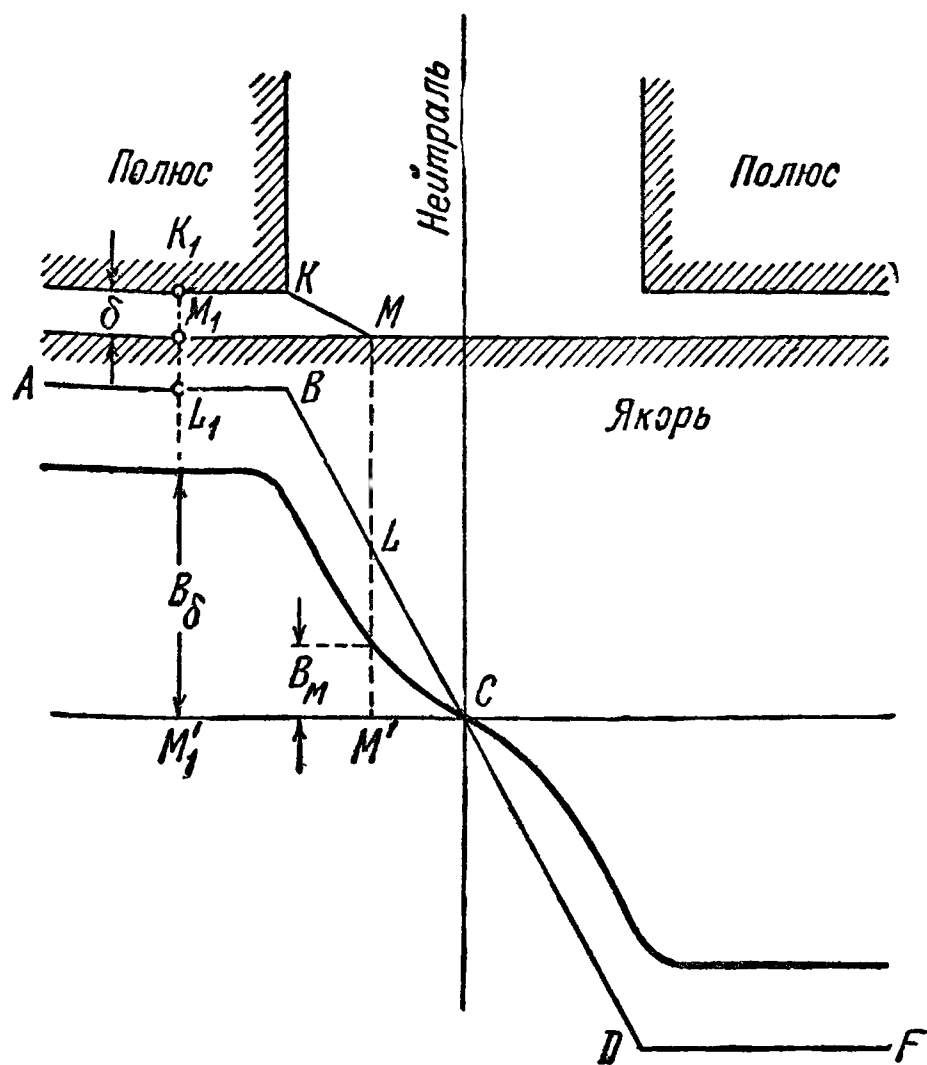
$$B_M : B_\delta = \frac{\overline{LM'}}{\overline{KM}} : \frac{\overline{L_1M_1'}}{\overline{K_1M_1}},$$

откуда

$$B_M = B_\delta \times \frac{\overline{LM'} \cdot \overline{K_1M_1}}{\overline{KM} \cdot \overline{L_1M_1'}}.$$

Этим способом можем построить всю кривую поля.

б) Второй приближенный способ. Другой приближенный способ (более точный, чем предыдущий), примененный Арнольдом, состоит в вычерчивании

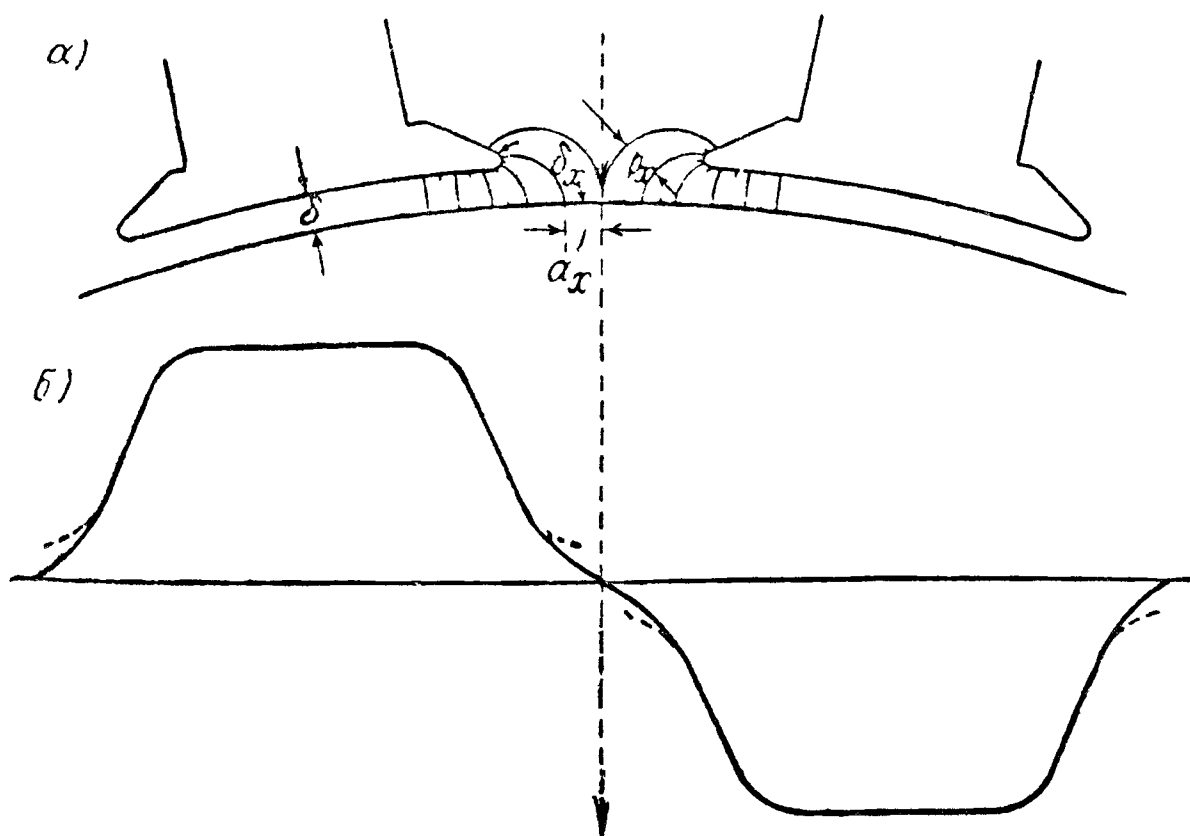


Фиг. 75. Приближенное построение кривой поля.

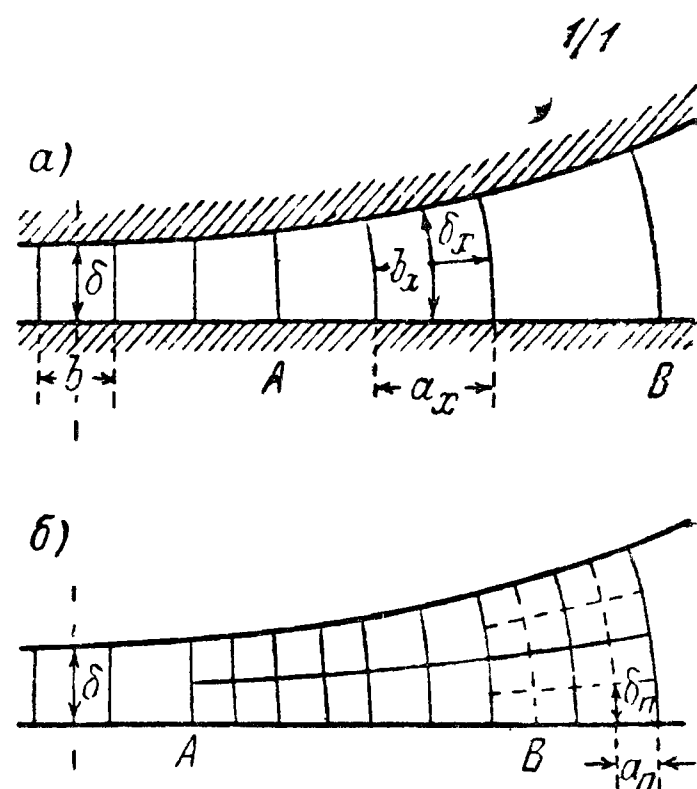
магнитных трубок в зазоре и покоится на том, что магнитная энергия поля имеет максимально возможное значение. Поэтому, если на-глаз вычертить несколько вариантов картин распределения индукции магнитного потока, т. е. картин магнитного поля, то наиболее вероятным, т. е. ближе всего соответствующим действительности, будет то распределение, которое даст наибольшее значение потока между полюсом и поверхностью якоря. При вычерчивании кривой поля принимаем поверхность якоря, обычно зубчатую, за гладкую. Считая разность магнитных потенциалов между поверхностями полюсного наконечника и якоря, т. е. м. д. с., неизменной, получим, что поток каждой из вычерченных магнитных трубок пропорционален ее проводимости.

Обозначив через  $b_x$  среднюю ширину, а через  $\delta_x$  — среднюю длину какой-нибудь трубки (фиг. 76, а и 77, а), можем написать, что магнитная проводимость  $\lambda_x$  трубки, имеющей в направлении оси машины размер 1 см, равна:

$$\lambda_x = \frac{b_x \cdot 1}{\delta_x} = \frac{b_x}{\delta_x}. \quad (19)$$



Фиг. 76. Приближенный способ Арнольда для построения кривой поля.



Фиг. 77. Построение кривой поля по Леманну: а — единичные трубки; б — подразделение единичных трубок.

Тогда пронизывающий трубку магнитный поток  $\Phi_x$  напишется так:

$$\Phi_x = F\lambda_x = F \frac{b_x}{\delta_x}. \quad (20)$$



Среднее значение магнитной индукции, соответствующей среднему сечению трубки ( $b_x \cdot 1$ ), будет:

$$\bar{B} = F \frac{b_x}{\delta_x} : (b_x \cdot 1) = F \cdot \frac{1}{\delta_x}. \quad (21)$$

Для точки  $x$  на поверхности якоря, охватываемой рассматриваемой трубкой, индукция будет во столько раз меньше  $\bar{B}$ , во сколько раз  $b_x$  меньше  $a_x$ , где  $a_x$  — сечение трубки у поверхности якоря:

$$B_x : \bar{B} = b_x : a_x,$$

откуда

$$B_x = \bar{B} \frac{b_x}{a_x} = F \cdot \frac{b_x}{a_x \delta_x}. \quad (22)$$

Под серединой полюса магнитные трубки имеют по всей длине одинаковое сечение ( $a_x = b_x$ ), причем длина их  $\delta_x = \delta$  — длине зазора. Вследствие этого индукция под серединой полюса:

$$B_\delta = F \frac{b_x}{a_x \delta} = F \frac{1}{\delta}. \quad (23)$$

Из (22) и (23) находим:

$$B_x : B_\delta = F \frac{b_x}{a_x \delta_x} : F \frac{1}{\delta},$$

откуда

$$B_x = B_\delta \frac{b_x \delta}{a_x \delta_x}. \quad (24)$$

Таким образом, исходя из  $B_\delta$  и промеряя на картине магнитных линий принятой за истинную) размеры  $b_x$ ,  $a_x$ ,  $\delta_x$ , мы можем найти для ряда точек поверхности якоря значения  $B_x$ , а следовательно, и построить картину поля.

Для точек, лежащих близко к нейтрали, мы получим для  $B_x$  значения чересчур большие, не соответствующие действительности. Это происходит вследствие того, что при указанном построении кривой поля мы пренебрегли наличием соседних полюсов, а потому должны были получить поле, которое симптотически спадает до нуля. Ошибку легко исправить, если пренебречь магнитными трубками у самой нейтрали. Тогда кривые полей под северным и южным полюсами получатся оборванными; недостающий участок можно получить, связав обе упомянутые оборванные картины прямой, как это сделано на фиг. 76, б. В нейтральной точке тогда получим  $B_x = 0$ , что и должно быть, а вся кривая будет близка к истинной. Площадь, охватываемая на фиг. 76, б построенной кривой и осью абсцисс, дает, очевидно, поток на 1 см длины якоря.

При конструировании полюсных наконечников нужно иметь в виду, что точки зрения осуществления хорошей коммутации желательно иметь широкую зону, в которой  $B_x$  должно быть возможно меньше, но в то же время бока кривой должны быть, по возможности, пологи для того, чтобы при работе машины не появилось неприятных звуков.

Изложенный метод построения кривой поля требует нескольких построений и сличения результатов, причем за истинную картину принимается та, которая, как отмечалось выше, дает максимальную площадь, охватываемую кривой и осью абсцисс.

Вычерчивание кривой поля значительно облегчается, если одновременно строить и равнопотенциальные поверхности, которые должны пересекать магнитные линии под прямым углом (фиг. 77, б). Эти две системы линий разбивают поле на четырехугольники с прямыми углами у вершины и криволиней-

ными сторонами, но при достаточном числе тех и других линий четырехугольники переходят почти в квадраты.

Можно сделать еще шаг вперед в сторону усовершенствования метода построения кривой поля, а именно, выбирать расстояние между смежными магнитными линиями и между линиями смежных равнопотенциальных поверхностей так, чтобы в каждом из получающихся четырехугольников среднее расстояние между равнопотенциальными поверхностями было равно среднему расстоянию между стенками трубок ( $b_x = \delta_x$ ). В этом случае (фиг. 77, б) проводимости трубок  $\lambda_x$ , определяемые по (19), станут друг другу равны и равны единице:

$$\lambda_x = \frac{b_x}{\delta_x} = 1. \quad (25)$$

Каждую такую магнитную трубку можно назвать *единичной трубкой*. Тогда для индукции  $B_x$  в точке  $x$  получим выражение:

$$B_x = B_\delta \frac{b_x \delta}{a_x \delta_x} = B_\delta \frac{\delta}{a_x}.$$

При таком способе построения картины поля, последнее разбивается на ряд единичных трубок; поток каждой трубки  $\varphi_x$ , согласно (20), будет:

$$\varphi_x = \Phi_x = F \lambda_x = F, \quad (26)$$

т. е. численно равен  $n$  с, поток же через избранную площадку (например на фиг. 77, б через площадку, очерченную между магнитными линиями  $A$  и  $B$ ) выразится так:

$$\Phi = \Sigma \varphi_x = m \varphi_x, \quad (27)$$

где  $m$  — число единичных трубок;  $m$  может быть и дробным числом. Дробь мы определяем, проводя дополнительные равнопотенциальные поверхности и магнитные линии (фиг. 77, б) таким образом, чтобы потоки получающихся частичных трубок соответственно равнялись:

$$\varphi' = \frac{\varphi}{2}, \quad \varphi'' = \frac{\varphi}{4} \text{ и т. д.}$$

Число единичных трубок, таким образом, на фиг. 77, б между  $A$  и  $B'$  равно  $m = 3\frac{1}{4}$ .

Н. с., создающие поток этих трубок, будут:

$$F' = F/2, \quad F'' = F/4 \text{ и т. д.}$$

Применяя выражение (25) к частичной трубке, имеющей проводимость, равную  $\frac{1}{n}$  проводимости единичной трубки, мы должны приравнять

$$b_x = \frac{1}{n} \delta_x; \quad a_x = a_n, \quad (28)$$

здесь  $a_n$  — основание единичной трубки. Тогда получим:

$$B_x = B_\delta \frac{\delta}{n a_n}. \quad (29)$$

По этой формуле мы получаем среднее значение индукции на поверхности якоря в пределах частичной трубки.

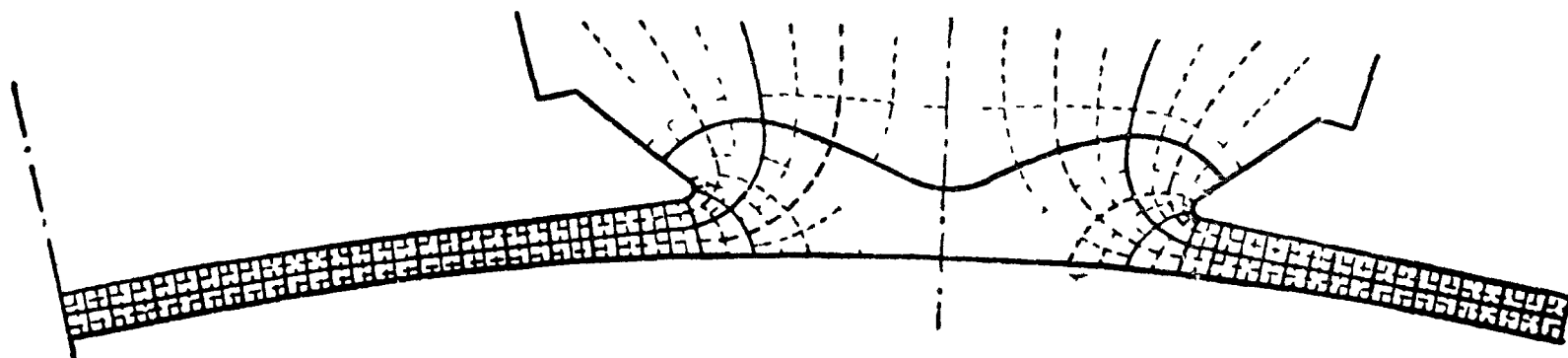
Рихтер считает,<sup>1</sup> что длину  $\delta_n$  между поверхностью якоря и ближайшей равнопотенциальной поверхностью можно определить точнее, чем расстоя-

<sup>1</sup> Р. Р и х т е р, Электрические машины, т I, 1924

не  $a_n$  по окружности якоря. Поэтому он рекомендует выражение (29) заменить следующим:

$$B_x = B_\delta \frac{\delta}{n\delta_n}. \quad (30)$$

Для получения возможно точной картины поля рекомендуется разбивать единичные трубки на части, однако слишком большое дробление может привести к уменьшению точности, так как уменьшается точность, с которой можно измерить отрезки на рисунке.



Фиг. 78. Картина магнитного поля в зазоре машины постоянного тока, построенная по Леманну.

По данному способу построение кривой поля начинается с трубки, ось которой совпадает с осью полюсов (фиг. 78). В этом месте магнитное поле — равномерное, и для указанной трубки имеем:

$$b_x = a_x = \delta. \quad (31)$$

## Б. ВЫЧИСЛЕНИЕ АМПЕРВИТКОВ ДЛЯ ОТДЕЛЬНЫХ УЧАСТКОВ ГЛАВНОЙ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

### 52. Вычисление ампервитков для сердечника якоря ( $AW_a$ )

Ампервитки  $AW_a$ , нужные при холостом ходе машины для проведения через сердечник якоря заданного магнитного потока  $\Phi_a$ , вычисляются по формуле:

$$AW_a = aw_a L_a, \quad (32)$$

где  $aw_a$  — ампервитки на 1 см пути магнитного потока  $\Phi_a$  в сердечнике якоря;  $L_a$  — средняя длина пути потока в сердечнике якоря; ее можно взять по эскизу поперечного разреза машины (фиг. 72), но можно определить и расчетным путем. Так, зная диаметры якоря,  $D_a$  — внешней и  $D_i$  — внутренней окружностей, и высоту сердечника якоря  $h_a$ , можно положить, с достаточным для практических целей приближением, что

$$L_a \approx \frac{\pi(D_i + h_a)}{2p} + h_a,$$

либо принять

$$L_a \approx \frac{\pi D}{2p}. \quad (33)$$

Ампервитки  $aw_a$  определяются из кривой намагничения  $B_a = f(aw_a)$  для данной марки листовой электротехнической стали по индукции в сердечнике якоря  $B_a$ .

Индукция

$$B_a = \frac{\Phi_a}{S}, \quad (34)$$

где  $S_a$  находится по размерам якоря из выражения:

$$S_a = h_a' (lk_{Fe}) = h_a' l_{Fe}. \quad (35)$$

Если якорь имеет  $n_r$  радиальных вентиляционных каналов, каждый шириною  $b_r$ , то, обозначая через  $l_\Sigma$  полную длину, занимаемую дисками сердечника якоря (без учета толстых фланцевых дисков, сжимающих якорь с торцов), получим:

$$l = l_\Sigma - n_r b_r.$$

Здесь  $l$  — пакетная длина якоря, а  $l_{Fe} = lk_{Fe}$  — эффективная длина якоря.

Входящий в (35) коэффициент  $k_{Fe} < 1$  учитывает изоляцию дисков друг от друга и их неровности (несмотря на спрессовку дисков). При толщине дисков  $\Delta = 0,5$  мм принимают на основании опыта  $k_{Fe} = 0,93$  — при двустороннем покрытии дисков изолирующим лаком,  $k_{Fe} = 0,90$  — при односторонней оклейке дисков бумагой (ныне применяется редко)

Коэффициент  $k_{Fe}$  представляет собой коэффициент заполнения якоря.

В рассматриваемом случае (отсутствие аксиальных вентиляционных каналов) высота  $h_a'$ , входящая в (35), вычисляется по формуле (см. фиг. 72):

$$h_a' = h_a = \frac{(D_a - 2h_n) - D_i}{2}, \quad (36)$$

где  $h_n$  — высота одного зубца якоря, равная высоте паза.

В случае наличия аксиальных вентиляционных каналов диаметром  $d_a$ , расположенных в шахматном порядке в два ряда (фиг. 31), высота  $h_a'$  берется по приближенной формуле:

$$h_a' \approx \frac{(D_a - 2h_n) - D_i}{2} - \frac{2}{3} d_a. \quad (37)$$

Если диаметры аксиальных вентиляционных каналов одного ряда —  $d_{a1}$ , а другого —  $d_{a2}$  (фиг. 32), то

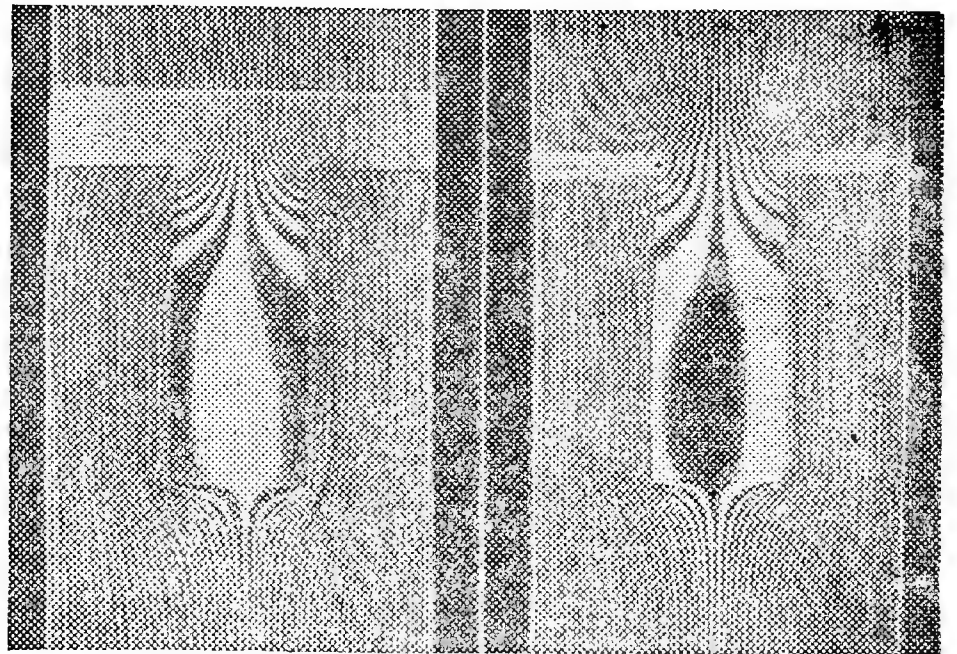
$$h_a' \approx \frac{(D_a - 2h_n) - D_i}{2} - \frac{2}{3} \left( \frac{d_{a1} + d_{a2}}{2} \right). \quad (37a)$$

### 53. Вычисление ампервитков для зубцового слоя якоря при прямоугольных пазах якоря ( $AW_z$ )

а) Поверхности уровня н. с. На фиг. 79 показаны полученные экспериментальным путем картины, аналогичные картинам распределения магнитного потока в зазоре и в зубцовом слое машины, причем фиг. 79, а относится к случаю машины с относительно большим, а фиг. 79, б — с малым зазором. При производстве упомянутого эксперимента между двумя близко поставленными прозрачными (стеклянными) плоскостями пропускалась жидкость (глицерин) и отмечались линии течения жидкости. Можно показать, что при постоянном давлении количество жидкости в сечении, перпендикулярном к ее течению, пропорционально 3-й степени толщины слоя жидкости. Таким образом, сделав расстояния между двумя упомянутыми плоскостями в различных местах неодинаковыми, получаем возможность получить аналогию магнитного поля при разных магнитных проницаемостях в различных местах. Разница в расстояниях между двумя параллельными плоскостями достигалась нанесением на одну из них слоя парафина и воска. В тех местах, которые должны были иметь большую проницаемость, воск осторожно снимался. Направления потоков жидкости становились видимыми при вспыскивании в соответствующих местах окрашенного глицерина, который дает тонкие окрашенные полосы.

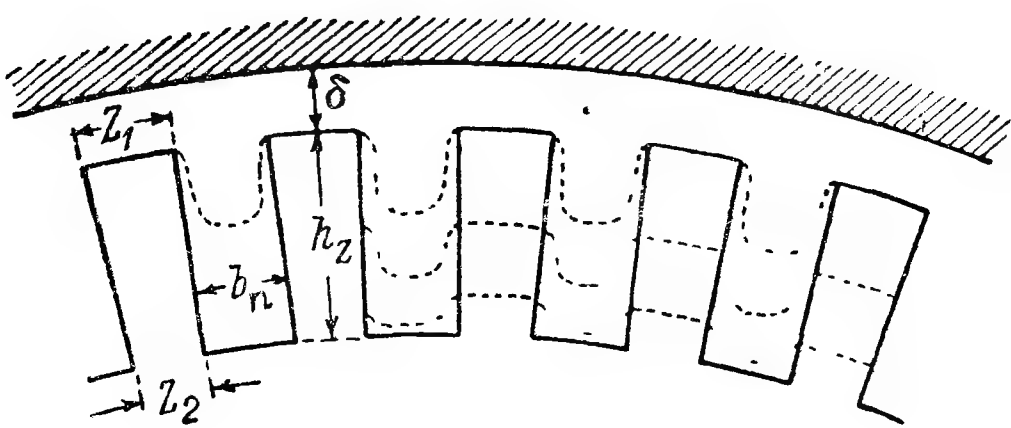


На фиг. 80 построена действительная картина расположения равнопотенциальных поверхностей (плоскостей, перпендикулярных к линиям магнитного потока). Картина эта сложна и трудно поддается учету. Можно сделать предположение, что равнопотенциальные поверхности расположены по окружностям концентрическим с внешней окружностью зубчатого якоря и предложить приближенный способ расчета ампервитков для зубцового слоя машины. Опыт показал, что он дает результат определения  $AW_z$ , вполне приемлемый для практики, несмотря на условность исходного предположения. К изложению этого способа мы и приступим, предполагая сначала, что зубцы якоря имеют из-за прямоугольной формы пазов постепенно сужающееся сечение по мере удаления от головки зубца к его основанию (фиг. 81).

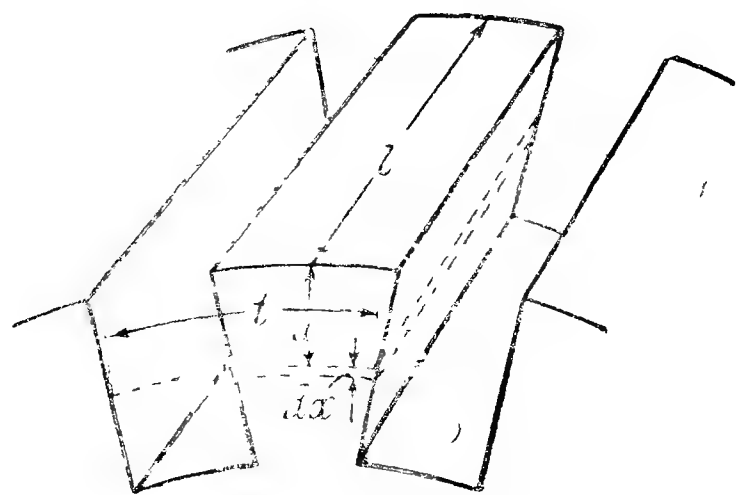


Фиг. 79 Картина магнитного поля в зазоре и зубцах при большом (слева) и малом (справа) зазорах.

**б) Обоснование расчета.** Проведем ряд цилиндрических концентрических поверхностей из центра якорной окружности, считая их условно потенциальными поверхностями. Одна из них расположена от головок зубцов на расстоянии  $x$  (фиг. 81), сечение зубца этой поверхностью обозначим через  $s_{zx}$ , а сечение паза — через  $s_{nx}$ . Величину магнитного потока через эти сечения, рассчитанного на зубцовое деление



Фиг. 80 Равнопотенциальные поверхности зубцового слоя.



Фиг. 81 Сечение зубчатого якоря концентрическими окружностями

якоря  $t_x = z_x + b_n$ , обозначим через  $\varphi_n$ . Его можем представить как сумму двух магнитных потоков: потока  $\varphi_{zx}$  через сечение зубца  $s_{zx}$  и потока  $\varphi_{nx}$  через сечение паза  $s_{nx}$ .

$$\varphi_a = \varphi_{zx} + \varphi_{nx}. \quad (38)$$

Разделим это выражение на  $s_{zx}$  и затем умножим и разделим второй член в правой части на  $s_{nx}$ , получаем:

$$\frac{\varphi_a}{s_{zx}} = \frac{\varphi_{zx}}{s_{zx}} + \frac{\varphi_{nx}}{s_{zx}}, \quad (39)$$

$$\frac{\varphi_a}{s_{zx}} = \frac{\varphi_{zx}}{s_{zx}} + \frac{\varphi_{nx}}{s_{zx}} \cdot \frac{s_{nx}}{s_{nx}}. \quad (40)$$

Здесь левая часть выражения (40) и первый член в его правой части, соответственно, равны:

$$\frac{\varphi_a}{s_{zx}} = B_{zix}; \quad (41)$$

$$\frac{\varphi_{zx}}{s_{zx}} = B_{zx}. \quad (42)$$

Очевидно, что  $B_{zix}$  — теоретическая индукция в сечении зубца  $s_{zx}$ , которая была бы в нём, если бы весь поток  $\varphi_a$  проходил через зубец, а  $B_{zx}$  — действительная индукция в зубце при проходящем через него потоке  $\varphi_{zx}$ .

Перепишав последний член в (40) в несколько ином виде, получаем:

$$\frac{\varphi_{nx}}{s_{zx}} \cdot \frac{s_{nx}}{s_{nx}} = \frac{\varphi_{nx}}{s_{nx}} \times \frac{s_{nx}}{s_{zx}} = B_{kx} \cdot \frac{s_{nx}}{s_{zx}}, \quad (43)$$

где

$$B_{kx} = \frac{\varphi_{nx}}{s_{nx}}. \quad (44)$$

Так как в воздухе  $B_{kx} = H_{kx}$ , то, вводя обозначение

$$k_{nx} = \frac{s_{nx}}{s_{zx}} \quad (45)$$

для второго множителя в третьем члене выражения (40), получаем вместо (43) следующее выражение.

$$H_{kx} k_{nx}. \quad (46a)$$

Здесь  $H_{kx}$  — напряженность поля в данном равнопотенциальном слое; она может быть представлена, согласно (13), так:

$$H_{kx} \approx \frac{aw_{zx}}{0,8} \approx 1,257 aw_{zx}, \quad (46b)$$

где  $aw_{zx}$  — ампервитки на 1 см, соответствующие действительной индукции в сечении зубца, лежащем в рассматриваемой эквипотенциальной поверхности. Коэффициент  $k_{nx}$  представляет собой отношение сечений паза и зубца в данной равнопотенциальной поверхности; таким образом, последний член в выражении (39) принимает вид:

$$1,257 aw_{zx} k_{nx}, \quad (47)$$

все выражение (39) может быть переписано так:

$$B_{zix} = B_{zx} + 1,257 aw_{zx} k_{nx}. \quad (48)$$

Этим выражением мы и воспользуемся при определении  $AW_z$ .

Воспроизводим на фиг. 82 кривую 1 намагничения листовой электротехнической стали той марки, из которой сделаны диски якоря. Для любого значения действительной индукции в зубце  $B_{zx} = \overline{KL}$  по кривой 1 имеем соответствующее значение  $aw_z = \overline{OK}$ . Тогда, пользуясь выражением (46a) для данного значения  $k_{nx}$ , можем вычислить второй член правой части выражения (40) и найти по (48) теоретическую индукцию  $B_{zix}$ . Таким образом, строим кривую 2 на фиг. 82.

На фиг. 83 приведено семейство кривых  $B_{zi}$  для ряда значений  $k_n + 1$  для обычных сортов листовой электротехнической стали Верхне-Исетского завода. Здесь же приведены исходные кривые намагничения электротехнической стали упомянутых марок.

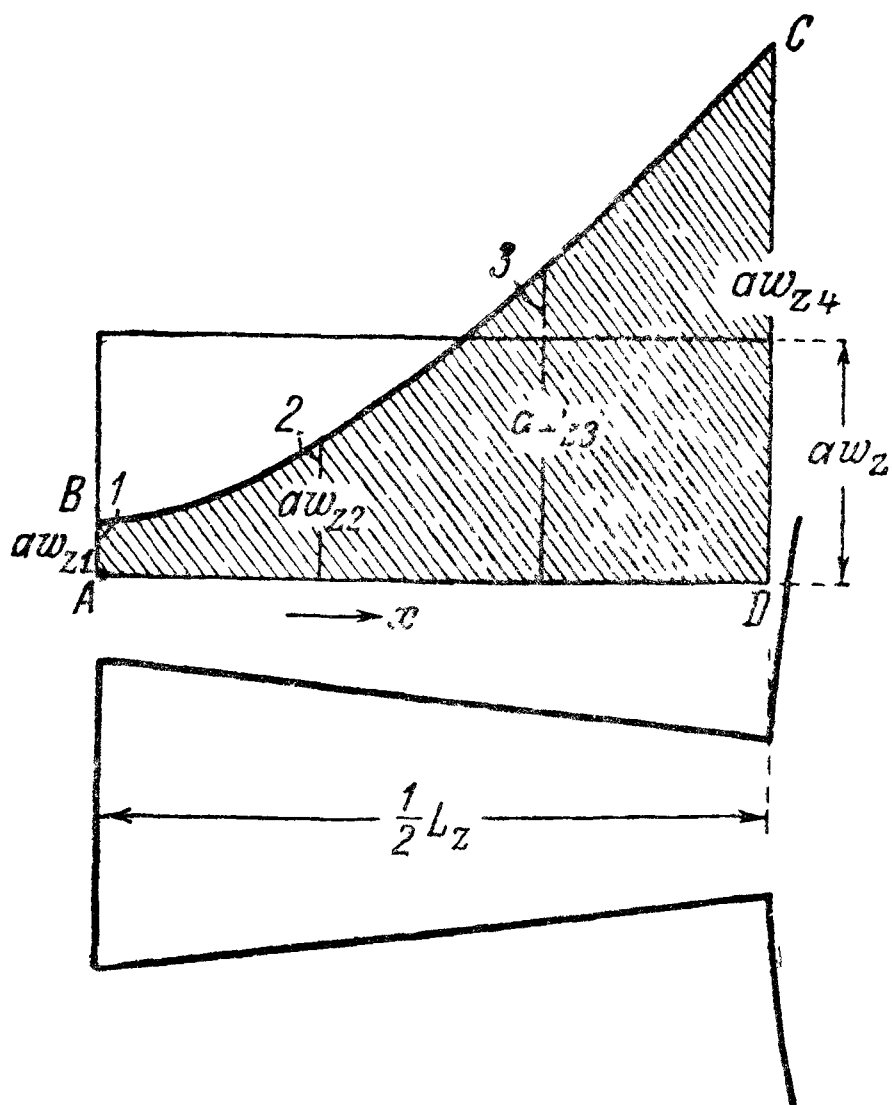


При  $Z$  зубцах зубцовые деления якоря в упомянутых трех поверхностях будут (фиг. 84):

$$t_1 = \frac{\pi D_a}{Z}; \quad t_2 = \frac{\pi(D_a - h_n)}{Z}; \quad t_3 = \frac{\pi D_i}{Z}. \quad (51)$$

Соответствующие ширины зубцов в этих поверхностях, если  $b_n$  — ширина паза, будут:

$$z_1 = t_1 - b_n, \quad z_2 = t_2 - b_n, \quad z_3 = t_3 - b_n. \quad (52)$$



Фиг. 84. К вычислению  $aw_z$  для зубцов

Величины соответствующих сечений зубцов в эквипотенциальных поверхностях, если  $l$  — пакетная длина якоря, а  $k_{Fe}$  — коэффициент заполнения сталью:

$$s_{z1} = z_1 l k_{Fe}; \quad s_{z2} = z_2 l k_{Fe};$$

$$s_{z3} = z_3 l k_{Fe}. \quad (53)$$

При прямоугольной форме пазов и при наличии радиальных вентиляционных каналов сечения по воздуху в трех эквипотенциальных поверхностях будут равны друг другу и напишутся так:

$$s_{n1} = s_{n2} = s_{n3} = b_n l_\Sigma, \quad (54)$$

где  $l_\Sigma$  — полная длина якоря.

Соответствующие значения коэффициента  $k_n$ :

$$k_{n1} = \frac{s_{n1}}{s_{z1}} = \frac{b_n l_\Sigma}{z_1 l k_{Fe}} = \frac{b_n}{z_1 k_{Fe}} \cdot \frac{l_\Sigma}{l}, \quad k_{n2} = \frac{b_n}{z_2 k_{Fe}} \cdot \frac{l_\Sigma}{l};$$

$$k_{n3} = \frac{b_n}{z_3 k_{Fe}} \cdot \frac{l_\Sigma}{l}. \quad (55)$$

Поток, проходящий в сердечник якоря на делении якоря  $t_1$  вверху зубца будет, если  $B_\delta$  — индукция в зазоре у якоря:

$$\varphi_a = B_\delta l t_1. \quad (56)$$

Поэтому теоретическая индукция в зубце будет возрастать по мере уменьшения сечения зубца и напишется так.

$$\left. \begin{aligned} B_{z1} &= \frac{\varphi_a}{s_{z1}} = \frac{B_\delta l t_1}{z_1 l k_{Fe}} = B_\delta \frac{t_1}{z_1 k_{Fe}}, \\ B_{z2} &= \frac{\varphi_a}{s_{z2}} = \frac{B_\delta l t_2}{z_2 l k_{Fe}} = B_\delta \frac{t_2}{z_2 k_{Fe}}, \\ B_{z3} &= \frac{\varphi_a}{s_{z3}} = \frac{B_\delta l t_3}{z_3 l k_{Fe}} = B_\delta \frac{t_3}{z_3 k_{Fe}}. \end{aligned} \right\} \quad (57)$$

Зная  $k_{n1}$ ,  $k_{n2}$  и  $k_{n3}$ , находим по кривым фиг. 83 для  $B_{z1}$ ,  $B_{z2}$  и  $B_{z3}$ , соответствующие значения  $aw_{z1}$ ,  $aw_{z2}$  и  $aw_{z3}$  и действительные индукции  $B_{z1}$ ,  $B_{z2}$  и  $B_{z3}$ <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Для расчета  $AW_z$  значения действительных индукций не нужны, но они понадобятся при дальнейшем расчете машины.



Опыт показывает, что кривая  $BC$  на фиг. 84 весьма близка к параболе, проведенной через вершины трех ординат, двух крайних (сечения 1 и 3) и средней (сечение 2), поэтому можем воспользоваться для среднего значения  $aw_z$  общеизвестной формулой Симпсона:

$$\bar{aw}_z = \frac{aw_{z1} + 4aw_{z2} + aw_{z3}}{6}. \quad (58)$$

Это значение  $aw_z$  и подставляем в (49).

При отсутствии радиальных вентиляционных каналов длина  $l_z = l$ , и в формулах для коэффициента  $k_n$  (55) множитель  $\frac{z}{l}$  становится равным единице, т. е. получаем:

$$k_{n1} = \frac{b_n}{z_1 k_{Fe1}}; \quad k_{n2} = \frac{b_n}{z_2 k_{Fe}}; \quad k_{n3} = \frac{b_n}{z_3 k_{Fe}}. \quad (59)$$

г) Возможные упрощения расчета. Если индукция  $B_{zi3}$  получается менее 18 000 гс, то можно принимать для всех трех сечений  $B_{zi3} = B_{zx}$  и, следовательно, пользоваться на фиг. 83 только нижней кривой, не вычисляя коэффициента  $k_z$ .

При необходимости быстро произвести предварительный расчет ампервитков  $AW_z$ , можно вычислить  $aw^2$  только по одному сечению зубца, проведенному на расстоянии  $\frac{1}{3}$  высоты паза (зубца) от его основания. Ошибка получается незначительной.

#### 54. Вычисление ампервитков для зазора ( $AW_\delta$ )

а) Сведение кривой магнитного поля в зазоре к прямоугольнику. На фиг. 85 дана картина распределения потока, построенная по способу, указанному в § 51 для гладкого якоря. Согласно построению (фиг. 78), проводимость каждой из трубок на 1 см длины ее в осевом направлении якоря машины равна единице ( $\lambda = 1$ ). Поэтому, если расчетную длину якоря, выраженную в см, обозначим через  $l_\delta$ , то проводимость трубки будет равняться  $l_\delta$  единицам. Для облегчения расчета мы можем привести все трубки к одной и той же длине  $\delta$ , для чего среднее сечение каждой из них придется изменить в отношении  $\delta/\delta_x$ , где  $\delta_x$  — первоначальная длина трубки. Очевидно, что тогда все трубки будут совершенно тождественны с исходной, проходящей под серединой полюса, для которой

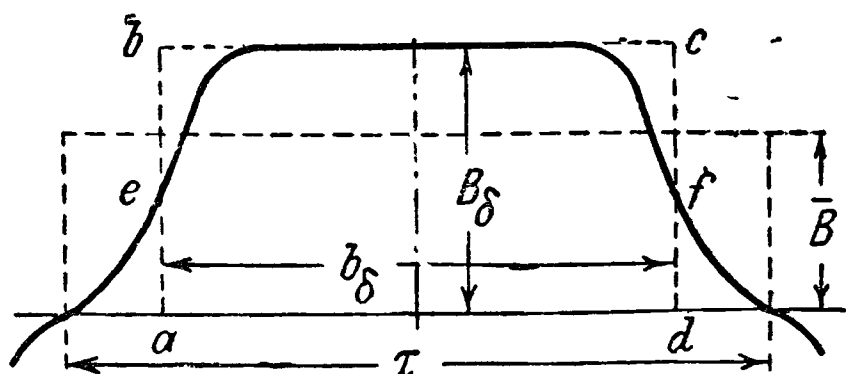
$$b_x = a_x = \delta.$$

Если число трубок равно  $m$ <sup>1</sup>, то их общее сечение выразится формулой:

$$S_\delta = ma_\delta \cdot l_\delta = m\delta l_\delta. \quad (60)$$

Индукция в трубках будет по всему сечению одна и та же, равная индукции  $B_\delta$  под серединой полюса. Поэтому можно написать:

$$B_\delta = \frac{\Phi_a}{S_\delta} = \frac{\Phi_a}{m\delta l_\delta}. \quad (61)$$



Фиг. 85. Приведение кривой магнитного поля в зазоре к прямоугольнику.

<sup>1</sup> На фиг. 78 для половины полюсного деления получаем:  $14\frac{7}{8} < \frac{m}{2} < 15$ , поэтому можно принять  $m = 29,9$ .

Введя обозначение  $b_\delta = m\delta$ , имеем:

$$S_\delta = b_\delta l_\delta. \quad (62)$$

Здесь  $b_\delta$  и  $l_\delta$  соответственно называют теоретической шириной полюсной дуги и теоретической длиной якоря.

б) Теоретическая полюсная дуга. Вышеприведенными рассуждениями мы свели фактическую картину распределения магнитного потока в зазоре к другому эквивалентному ему и имеющему индукцию  $B_\delta$  по всему сечению  $S_\delta$ . По существу это есть преобразование площади  $S$ , ограниченной кривой поля и осью абсцисс, в прямоугольник с высотой  $B_\delta$  и основанием  $b_\delta$ . Если ту же площадь преобразуем в прямоугольник с основанием  $\tau$ , то высота этого прямоугольника будет представлять не что иное, как среднее значение индукции  $B_{\text{med}}$  на полюсном делении. Таким образом, можно написать, что

$$S = B_\delta b_\delta = B_{\text{med}} \tau,$$

откуда

$$\alpha_\delta = \frac{b_\delta}{\tau} = \frac{B_{\text{med}}}{B_\delta}. \quad (63)$$

Отношение  $\alpha$  называется коэффициентом расчетной полюсной дуги.

К построению кривой поля по вышеуказанному способу, когда  $b_\delta$  определяется как произведение числа единичных трубок на  $\delta$ , прибегают только в тех случаях, когда полюсный башмак со стороны зазора очерчен по эксцентричной окружности. Обычно он очерчивается слегка приподнятыми краями, чтобы придать бокам кривой поля пологий характер. В обоих случаях можно не строить кривой поля и принимать  $b_\delta$  по нижеследующим приближенным формулам.

В случае, когда полюсные башмаки очерчены по концентричной окружности, поступаем следующим образом: проводим из центра якоря два радиуса, касательные к краям полюсных башмаков. Они вырезают из окружности якоря дугу  $b_p$ , которую можем найти по углу  $\gamma$  между упомянутыми радиусами из соотношений:

$$\frac{b_p}{\pi D_a} = \frac{\gamma}{360^\circ}; \quad b_p = \frac{\gamma}{360^\circ} \pi D_a, \quad (64)$$

здесь  $\gamma$  — угол перекрытия полюсной дуги, а  $b_p$  — действительная полюсная дуга; отношение ее к полюсному делению  $\tau$ :

$$\alpha_p = \frac{b_p}{\tau}, \quad (65)$$

называется коэффициентом действительной полюсной дуги.

В рассматриваемом случае (концентричные полюсные башмаки) можем принять, что теоретическая полюсная дуга

$$b_\delta = b_p + 2\delta. \quad (66)$$

Если полюсные башмаки имеют приподнятые края, что делается с целью придания бокам кривой поля пологого вида, то можем положить:

$$b_\delta \approx b_p; \quad \alpha_\delta = \alpha_p. \quad (66a)$$

При выборе  $b_p$  (или, что то же, угла  $\gamma$ ) стремятся получить  $\alpha_\delta$  в пределах 0,60—0,75. В машинах с добавочными полюсами обычно берут

$$\alpha_\delta \approx 0,675. \quad (67)$$

в) Расчет ампервитков  $AW_\delta$ . Сведение индукции в зазоре к прямоугольной форме позволяет воспользоваться для определения  $AW_\delta$  общей формулой (15), которая в этом случае дает:

$$AW_\delta = aw_\delta L_\delta. \quad (68)$$

По (10) имеем:  $aw_\delta = 0,8 H_\delta$ , а так как  $H_\delta = B_\delta$ , то  $aw_\delta = 0,8 B_\delta$ ; кроме того,

$$L_\delta = 2\delta, \quad (69)$$

поэтому

$$AW_\delta = 0,8 B_\delta \cdot 2\delta = 1,6 \delta B_\delta. \quad (70)$$

Мы вычислили ампервитки  $AW_\delta$  для случая гладкого якоря. В зубчатом якоре проводимость зазора уменьшится, что равносильно увеличению зазора  $\delta$ ; это можно учесть введением в (70) коэффициента  $k_\delta > 1$ , тогда

$$AW_\delta = 1,6 k_\delta \delta B_\delta. \quad (71)$$

Коэффициент  $k_\delta$  будем называть коэффициентом зубчатости зазора, или, сокращенно, коэффициентом зазора.

г) Коэффициент зазора  $k_\delta$  должен учесть уменьшение проводимости зазора зубчатого якоря по сравнению с проводимостью гладкого якоря. Для гладкого якоря проводимость, рассчитанная на деление  $t_1$  якоря по верху зубца, напишется так:

$$\lambda_\delta = \frac{t_1 l}{\delta}.$$

Сохраняя те же обозначения, что и раньше, можем для проводимости зубчатого якоря  $\lambda_\delta'$  на дуге  $t_1$  написать:

$$\lambda_\delta' = \sum \frac{b_x l}{\delta_x} = l \sum \frac{b_x}{\delta_x}.$$

Тогда, согласно определению,

$$k_\delta = \lambda_\delta : \lambda_\delta' = \left( \frac{t_1 l}{\delta} \right) : \left( l \sum \frac{b_x}{\delta_x} \right) = \frac{t_1}{\delta \sum \frac{b_x}{\delta_x}}. \quad (72)$$

Очевидно, что, построив картину распределения поля в зазоре зубчатого якоря и подсчитав на дуге  $t_1$  сумму  $\sum \frac{b_x}{\delta_x}$ , мы сможем по (72) найти  $k_\delta$ . Делая ряд упрощающих предположений, можно вывести формулу для  $k_\delta$ , учитывающую наиболее важные факторы, влияющие на величину  $k_\delta$ ; такими оказываются соотношения  $\frac{z_1}{b_n}$  и  $\frac{b_n}{\delta}$ . Формула получается громоздкой, поэтому был сделан ряд попыток упростить ее, не искажая результатов. Можно показать, что теоретическую формулу для  $k_\delta$  можно представить достаточно точно в виде:

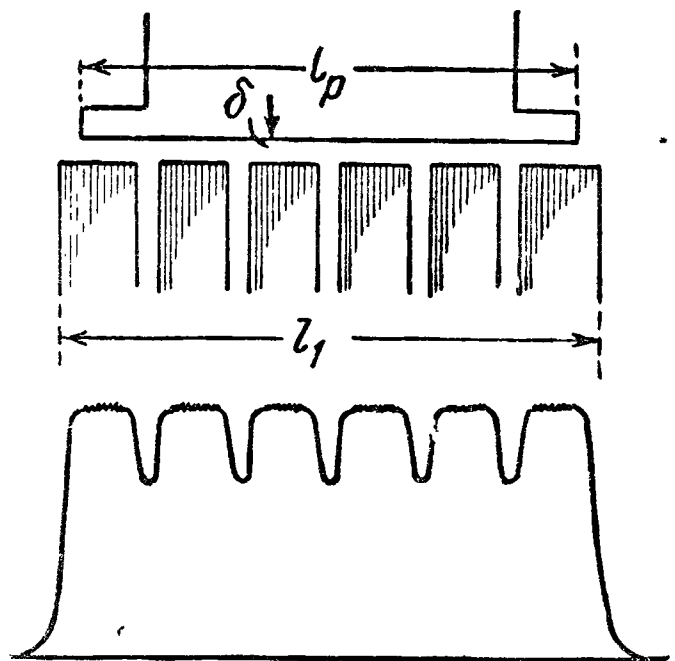
$$k_\delta = \frac{t_1 + 5\delta \left( 1 + \frac{z_1}{b_n} \right)}{z_1 + 5\delta \left( 1 + \frac{z_1}{b_n} \right)}; \quad (73)$$

Нетрудно видеть, что при  $\frac{z_1}{b_n} = 1,0$  она принимает вид:

$$k_\delta = \frac{t_1 + 10\delta}{z_1 + 10\delta}, \quad (74)$$

это и есть эмпирическая формула, которой обычно пользуются. При желании более точного вычисления  $k_\delta$  можно рекомендовать пользоваться формулой (73), которая при вычислениях незначительно сложнее формулы (74).

д) Расчетная длина якоря  $l_\delta$ . Для нахождения ее нужно рассмотреть распределение магнитного потока в зазоре по сечению его плоскостью, проведенной через ось якоря и ось полюсов. Построение картины такого распределения для случая покоящегося якоря, выполненное по методу, который был изложен



Фиг. 86. Кривая магнитного поля якоря в осевом направлении при покоящемся якоре.

выше, приведено на фиг. 86. Маленькие, чуть заметные зубчики соответствуют прослойкам между тонкими дисками якоря, большие — радиальным вентиляционным каналам. Преобразовав площадь, ограниченную осью абсцисс и полученной кривой, в прямоугольник с высотой  $B_\delta$ , получим искомую теоретическую или расчетную длину якоря при покоящемся якоре.

Распределение потока изменится, если якорь приведен во вращение с постоянной скоростью. При вращении якоря в торцевых листах, ограничивающих пакеты якоря, и в прочих листах начнут появляться э. д. с. от сечения ими перпендикулярно входящих в них линий магнитного потока. Эти э. д. с. создадут токи (вихревые), которые образуют свое магнитное

поле, почти полностью уничтожающее поле, их создавшее. Вследствие этого, практически во вращающемся якоре почти все линии магнитного потока, исходящие из полюсов (или входящие в полюса), будут в зазоре входить в торцы дисков якоря. Вследствие этого сечение потока  $\Phi_a$ , равное при выходе его из полюса  $b_\delta l_p$ , станет равным  $b_\delta l k_{Fe}$ . Среднее сечение потока в зазоре будет:

$$S_\delta = b_\delta \frac{lk_2 + l_p}{2} \approx b_\delta l_\delta \approx b_\delta l, \quad (75)$$

так как практически можно принять:

$$l_\delta \approx l. \quad (76)$$

## 55. Вычисление ампервитков для полюсных сердечников с полюсными башмаками и для ярма ( $AW_m$ , $AW_j$ )

а) Выше, в § 50, мы отметили, что магнитный поток по сечениям сердечника полюса имеет в разных сечениях его разную величину из-за потоков магнитного рассеяния. Однако обычно при расчете главной магнитной цепи считают, что во всех сечениях полюсного сердечника магнитный поток один и тот же, а именно  $\Phi_m$ ; это влечет при вычислении ампервитков  $AW_m$  к некоторому их преувеличению. Точно так же пренебрегают тем обстоятельством, что полюсный башмак шире, чем полюсный сердечник. Таким образом, принимают, что (см. далее, фиг. 89) сечение сердечника и полюсного башмака одно и то же и имеет размеры: по оси машины —  $l_m$ , поперечный —  $b_m$ , высота полюса с башмаком равна  $h_m$ . Так как полюсный сердечник и полюсный башмак ныне штампуются из листов стали толщиной  $\Delta = 1$  мм или  $\Delta = 1,5$  мм, то при подсчете сечения  $Q_m$  вводят коэффициент  $k_{Fe}'$ , учитывающий неплотность прилегания листов сердечника при спрессовке их. Таким образом, имеем.

$$Q_m = b_m l_m k_{Fe}'. \quad (77)$$



Для коэффициента  $k_{\text{Fe}}'$  — заполнения сердечника полюсов — принимают значения:

$$\left. \begin{aligned} k_{\text{Fe}}' &= 0,95 \text{ — для листов толщиной } \Delta = 1 \text{ мм,} \\ k_{\text{Fe}}' &= 0,97 \text{ — » » » } \Delta = 1,5 \text{ мм.} \end{aligned} \right\} \quad (78)$$

Высота полюса (фиг. 72)

$$h_m = \frac{D_{j1} - (D_a + 2\delta)}{2}, \quad (79)$$

и, соответственно, длина магнитных линий в полюсах (на 2 полюса):

$$L_m = 2h_m. \quad (80)$$

Индукция в полюсном сердечнике:

$$B_m = \frac{\Phi_m}{Q_m} = \frac{\Phi_m}{b_m l_m k_{\text{Fe}}'} = \frac{\Phi_a \sigma}{b_m l_m k_{\text{Fe}}'}. \quad (81)$$

Коэффициент  $\sigma$  обычно лежит в пределах 1,15—1,25. При расчете, руководствуясь данными ранее рассчитанных машин, берут приближенное значение  $\sigma$ . Если таких данных нет, то можно воспользоваться табл. 10, в которой приведены значения  $\sigma$  в зависимости от диаметра якоря и число полюсов.

Таблица 10

Значения  $\sigma$  в зависимости от диаметра якоря и числа полюсов

Для 4-полюсных машин с диаметром якоря до 25 см . . . . .	1,25
Для многополюсных машин с диаметром якоря до 75 см . . . . .	1,20
То же до 150 см . . . . .	1,18
То же более 150 см . . . . .	1,15

Для индукции  $B_m$  находят из кривой намагничивания листовой стали, из которой штампуются полюсы, ампервитки  $aw_m$  на 1 см пути, а по ним и по  $L_m$  (80) вычисляют полные ампервитки  $AW_m$  на пару полюсов:

$$AW_m = aw_m \cdot L_m = aw_m \cdot 2h_m. \quad (82)$$

б) При подсчете  $AW_j$  принимаем, что поток одинаков по всей длине пути  $L_j$ , что, как мы видели, не совсем точно и ведет к некоторому преувеличению  $AW_j$ . Поток в ярме равен половине потока  $\Phi_m$ , так как  $\Phi_m$  раздваивается при переходе из полюсов в ярмо:

$$\Phi_j = \frac{1}{2} \Phi_m.$$

Если размер ярма по оси машины  $l_j$ , а высота  $h_j$ , то

$$S = b_j h_j. \quad (83)$$

Если сечение не прямоугольное, то его приводим к эквивалентному прямоугольнику.

Индукция в ярме

$$B_j = \frac{\frac{1}{2} \Phi_m}{S_j} = \frac{\Phi_m}{2b_j h_j} = \frac{\sigma \Phi_a}{2b h_j}.$$

По кривой намагничивания материала, из которого сделано ярмо (чугун или сталь), находим  $aw_j$  на 1 см пути в ярме для индукции  $B_j$  и вычисляем полные ампервитки  $AW_j$ :

$$aw_j = f(B_j), \quad AW_j = aw_j L_j. \quad (84)$$

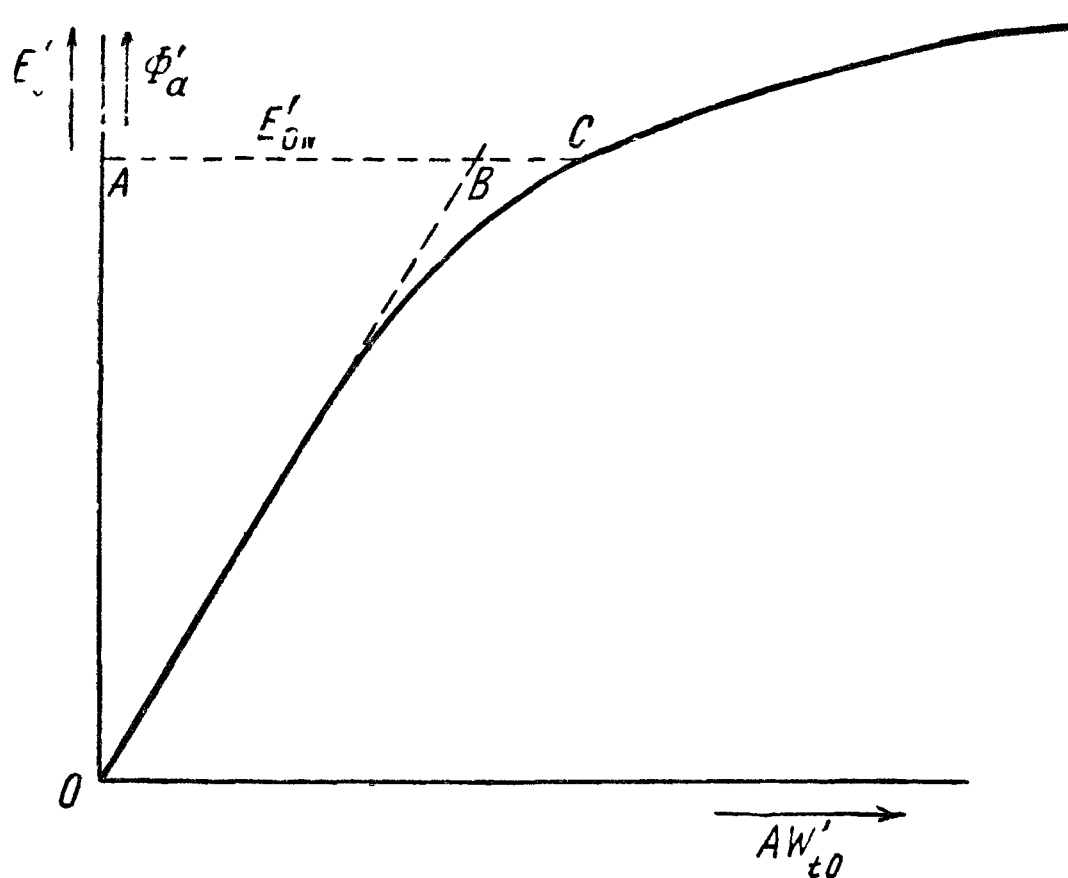
Длину  $L_j$  можно принять равной (фиг. 72):

$$L_j = \frac{\pi (D_j - h_j)}{2p}. \quad (85)$$

### 56. Расчетная кривая намагничения и характеристика генераторного холостого хода

Вычислив ампервитки для отдельных участков магнитной цепи при холостом ходе машины, вращающейся генератором вхолостую при неизменной номинальной скорости, находим по (16а)  $AW_k$  на одну магнитную цепь и по (14) на всю машину. Вычисление мы делали для потока  $\Phi_{a0}$ , который дает при номинальной скорости вращения номинальное напряжение  $E_{oN} = U_N$  на зажимах машины.

Задаваясь рядом значений  $E_0'$ , меньших и больших, чем  $E_{oN} = U_N$ , можем вычислить для них значения магнитного потока  $\Phi_a$  и соответствующие им значения  $AW_x$ , по которым найдем  $AW'_{k0}$  и  $AW'_{t0}$  для любого  $E_0'$ .



Фиг. 87. Кривая намагничения и х. г. х. х. машины

Откладывая в прямоугольных координатах значения ампервитков  $AW'_t$  по оси абсцисс и соответствующие им значения  $\Phi'_a$  по оси ординат, можем построить кривую намагничения машины при холостом ходе машины генератором:  $\Phi'_a = f(AW'_{t0})$  (фиг. 87).

Так как поток  $\Phi'_a$  пропорционален э. д. с. холостого хода  $E_0'$  (см. дальше), а ампервитки  $AW'_{t0}$  пропорциональны току намагничения  $i$  (число витков обмотки возбуждения неизменно), то та же кривая даст в пересчитанных масштабах и при неизменной номинальной скорости вращения зависимость

$E_0' = f(i)$ , называемую характеристикой генераторного холостого хода, что сокращенно будем обозначать в дальнейшем х. г. х. х.<sup>1</sup>

При небольших значениях потока  $\Phi'_a$  насыщение отдельных ферромагнитных участков машины ничтожно, а потому сумма всех ампервитков  $AW'_{t0}$  мало отличается от ампервитков  $AW'_{\delta 0}$ , необходимых для проведения потока  $\Phi'_a$  через зазор  $\delta$ . Вследствие этого начальная часть расчетной кривой намагничения, или, что то же, х. г. х. х., имеет прямолинейный характер, так как ампервитки  $AW'_\delta$  пропорциональны потоку  $\Phi'_a$ .

По мере увеличения  $\Phi'_a$  начинает сказываться насыщение, оно влечет за собой возрастание суммы ампервитков  $\Sigma AW'_{Fe}$ , необходимых для ферромагнитных участков магнитной цепи машины, что, в свою очередь, обуславливает изгиб кривой в сторону возрастающих абсцисс, и постепенно кривая вновь приближается к прямой, наклоненной к оси абсцисс под значительно меньшим углом, чем у начала координат. Выпуклую часть кривой намагничения называют **к о л е н о м**.

Если начальную прямолинейную часть х. г. х. х. продолжить до пересечения с горизонтальной прямой, проведенной через  $U = U_{oN} = E_{oN}$ , то отрезок  $\overline{AB}$  даст нам ампервитки  $AW_{\delta 0} \cdot p$ , необходимые при холостом ходе для проведения магнитного потока через зазор.

Мы умышленно говорим о характеристике генераторного холостого хода потому, что машина, работая двигателем, имеет характеристику **д в и г а т е л ь н о г о** холостого хода, которая имеет другой физический смысл.

В нормальных машинах постоянного тока точка  $E_{ON}$  лежит на колене, причем (фиг. 87) отношение  $\frac{\overline{AC}}{\overline{AB}} \approx 1,10$  (с небольшими отступлениями в ту и другую сторону).

## В. ДОБАВОЧНЫЕ УЧАСТКИ ГЛАВНОЙ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ И УТОЧНЕНИЯ НЕКОТОРЫХ РАСЧЕТОВ

### 57. Общие замечания

Зубцы мы предполагали выше конической формы, которую они получают при прямоугольных пазах якоря. Это наиболее распространенная форма пазов якоря, но встречаются и другие. Как вести расчет ампервитков  $AW_z$  при других формах пазов и соответственно зубцов якоря рассматривается в § 58.

Иногда приходится учитывать ампервитки для стыка сердечников полюсов с ярмом; это рассматривается в § 59.

В компенсированных машинах постоянного тока (машинах с компенсационной обмоткой) полюсные башмаки главных полюсов получают своеобразную развитую форму из-за пазов для укладки компенсационной обмотки. В этом случае полюсные башмаки приходится выделять в особый участок и вести для него подсчет потребных ампервитков особо, см. § 60.

Как мы видели (§ 56), характеристика холостого хода, или (что то же) кривая намагничивания машины, вначале прямолинейна. Иногда, по условиям устойчивости напряжения машины, нужно, чтобы х. г. х. была криволинейной почти от начала координат. В этом случае в полюсных сердечниках устраивают небольшие участки, быстро насыщающиеся, или магнитные прокладки между сердечниками полюсов и ярмом. Этот вопрос рассмотрен в § 61.

В заключение в § 62 рассматривается расчетная проверка значения коэффициента магнитного рассеяния, выбираемого при расчете главной магнитной цепи ориентировочно.

### 58. Вычисление ампервитков для зубцового слоя при овальных и трапецевидных пазах якоря ( $AW_z$ )

В случае овальных (фиг. 88, а) или трапецевидных (фиг. 88, б) пазов якоря, применяемых в некоторых случаях, метод определения по трем сечениям зубцового слоя среднего значения ампервитков  $aw_z$  (58) на 1 см пути магнитного потока и ампервитков  $AW_z$  (49) (на весь зубцовый слой) остаются в силе. При этом сечения зубцов проводятся по делениям зубцов  $t_1'$ ,  $t_3$  и  $t_2 = \frac{t_1' + t_3}{2}$  (фиг. 88). Расчетные формулы не требуют пояснений, так как все входящие в них величины ясны из фиг. 88;  $Z$  — число пазов якоря.

О в а л ь н ы е п а з ы (фиг. 88, а)  
Т р а п е ц е в и д н ы е п а з ы (фиг. 88, б)  
Р а с ч е т н ы е з у б ц о в ы е д е л е н и я

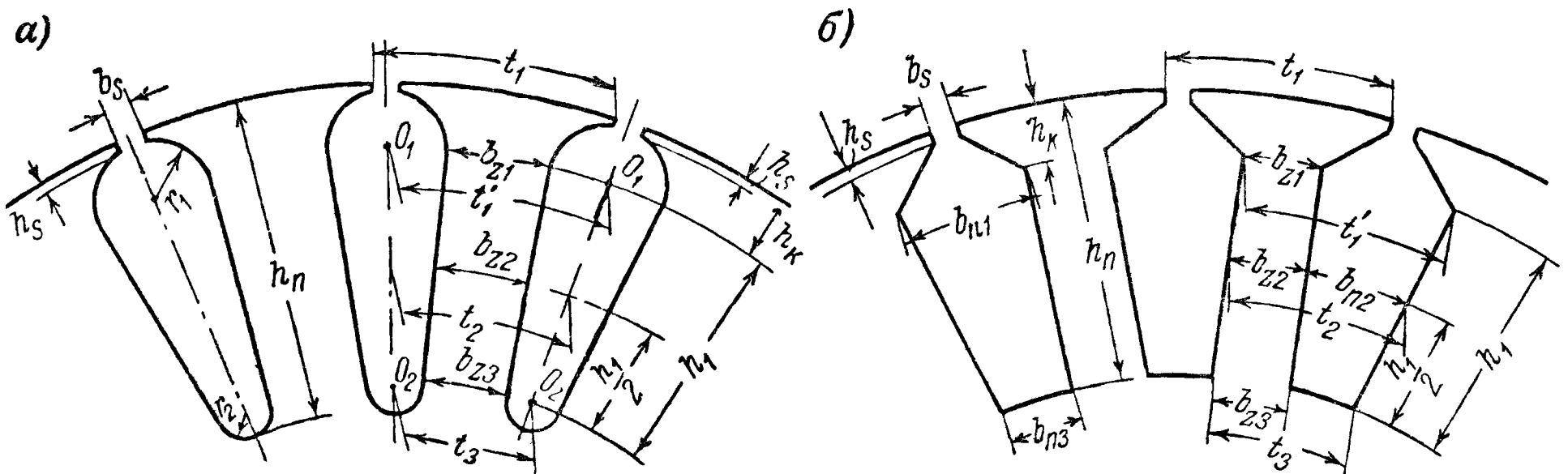
$$\left. \begin{aligned} t_1' &= \frac{\pi [D_a - 2(h_s + r_1)]}{Z}; & t_1' &= \frac{\pi (D_a - 2h_k)}{Z}; \\ t_2 &= \frac{\pi [D_a - 2(h_s + r_1) - h_1]}{Z}; & t_2 &= \frac{\pi (D_a - 2h_k - h_1)}{Z}; \\ t_3 &= \frac{\pi [D_a - 2(h_n - r_2)]}{Z}. & t_3 &= \frac{\pi (D_a - 2h_n)}{Z}. \end{aligned} \right\} \quad (86)$$

Расчетная ширина зуба

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= t_1' - 2r_1, & z_1 &= t_1' - b_{n1}; \\ z_2 &= t_2 - (r_1 - r_2); & z_2 &= t_2 - \frac{b_{n1} + b_{n3}}{2}; \\ z_3 &= t_3 - 2r_2. & z_3 &= t_3 - b_{n3}. \end{aligned} \right\} \quad (87)$$

Расчетная ширина по воздуху

$$\left. \begin{aligned} b_{n1} &= 2r_1, & b_{n1} & \text{(по фигуре)}, \\ b_{n2} &= r_1 + r_2; & b_{n2} &= \frac{b_{n1} + b_{n3}}{2}, \\ b_{n3} &= 2r_2. & b_{n3} & \text{(по фигуре)}. \end{aligned} \right\} \quad (88)$$



Фиг. 88 Овальные и трапецевидные пазы якоря.

Расчетное сечение по воздуху

а) В отсутствие радиальных вентиляционных каналов

$$\left. \begin{aligned} S_{n1} &= 2r_1 l, & S_{n1} &= b_{n1} l, \\ S_{n2} &= (r_1 + r_2) l; & S_{n2} &= \frac{b_{n1} + b_{n2}}{2} l, \\ S_{n3} &= 2r_2 l. & S_{n3} &= b_{n3} l. \end{aligned} \right\} \quad (89)$$

б) При наличии радиальных вентиляционных каналов

$$\left. \begin{aligned} S_{n1} &= 2r_1 l_{\Sigma}; & S_{n1} &= b_{n1} l_{\Sigma}; \\ S_{n2} &= (r_1 + r_2) l_{\Sigma}; & S_{n2} &= \frac{b_{n1} + b_{n2}}{2} l_{\Sigma}; \\ S_{n3} &= 2r_2 l_{\Sigma}. & S_{n3} &= b_{n3} l_{\Sigma}. \end{aligned} \right\} \quad (90)$$

Значения коэффициента  $k_n$

а) В отсутствие радиальных вентиляционных каналов

$$\left. \begin{aligned} k_{n1} &= \frac{S_{n1}}{S_{z1}} = \frac{2r_1 l}{z_1 k_{Fe} l} = \frac{2r_1}{z_1 k_{Fe}}; & k_{n1} &= \frac{b_n}{z_1 k_{Fe}}; \\ k_{n2} &= \frac{r_1 + r_2}{z_2 k_{Fe}}; & k_{n2} &= \frac{b_{n1} + b_{n2}}{2} \cdot \frac{1}{z_2 k_{Fe}}; \\ k_{n3} &= \frac{2r_2}{z_3 k_{Fe}}. & k_{n3} &= \frac{b_{n3}}{z_3 k_{Fe}}. \end{aligned} \right\} \quad (91)$$



**б) При наличии радиальных вентиляционных каналов**

$$\left. \begin{aligned} k_{n1} &= \frac{2r}{z_1 k_{\text{Fe}}} \cdot \frac{l_{\Sigma}}{l}, & k_{n1} &= \frac{b_n}{z_1 k_{\text{Fe}}} \cdot \frac{l_{\Sigma}}{l}, \\ k_{n2} &= \frac{r_1 + r_2}{z_2 k_{\text{Fe}}} \cdot \frac{l_{\Sigma}}{l}, & k_{n2} &= \frac{b_{n1} + b_{n2}}{2z_2 k_{\text{Fe}}} \cdot \frac{l_{\Sigma}}{l}, \\ k_{n3} &= \frac{2r_2}{z_3 k_{\text{Fe}}} \cdot \frac{l_{\Sigma}}{l}, & k_{n3} &= \frac{b_{n3}}{z_3 k_{\text{Fe}}} \cdot \frac{l_{\Sigma}}{l}. \end{aligned} \right\} \quad (92)$$

Расчетная длина пути магнитных линий

$$L_z = 2(h_n - 0,2r_1). \quad L_z = 2(h_n - 0,2h_k). \quad (93)$$

Названия некоторых из введенных размеров:  $r_1$  — наружный радиус;  $r_2$  — внутренний радиус,  $b_s$  — ширина прорези,  $h_s$  — высота прорези;  $h_1$  — высота прямолинейной части зубца:

$$h_1 = h_n - h_k. \quad (94)$$

Аналогично по идее вычисляются те же размеры при формах пазов, отличающихся от рассмотренных.

**59. Вычисление ампервитков для стыка сердечника и ярма ( $AW_s$ )**

В § 42 (гл. I) было указано, что в стыке полюсных сердечников с ярмом прокладывается несколько листов динамной стали толщиной  $\Delta = 0,5$  мм для обеспечения возможности регулировать размер зазора  $\delta$ . Из-за неплотностей прилегания сердечников и ярма, в особенности при большой длине  $l_m$  сердечников в направлении длины машины, нужно учитывать ампервитки на добавочный воздушный зазор  $\delta_s$ , образующийся в этом случае в стыке. Расчет можно произвести по формуле, аналогичной той, которая была выведена в § 54 для основного зазора, заменив в ней  $\delta$  на  $\delta_s$  и  $B_\delta$  на  $B_m$ :

$$AW_s = 1,6 B_m \delta_s. \quad (95)$$

Здесь принимают

$$\delta_s = 0,02 \frac{l_m}{100} + 0,01 \text{ см},$$

где  $l_m$  — длина полюсного башмака.

**60. Вычисление ампервитков для полюсного сердечника и полюсного башмака компенсированной машины ( $AW_m$ )**

В некомпенсированной машине ампервитки определяются сразу на эти два участка, объединяемые в один. В компенсированной машине надо подсчитывать отдельно ампервитки для полюсного сердечника  $AW_m'$  и ампервитки для зубцового слоя полюсного башмака  $AW_{zc}$ , занятого пазами для компенсационной обмотки, так как в этом слое обычно получается заметное насыщение стали.

Расчет  $AW_m'$  можно вести по (82), заменив  $h_m$  на  $h_m - h_{nc}$ , где  $h_{nc}$  — высота упомянутых пазов (фиг. 89).

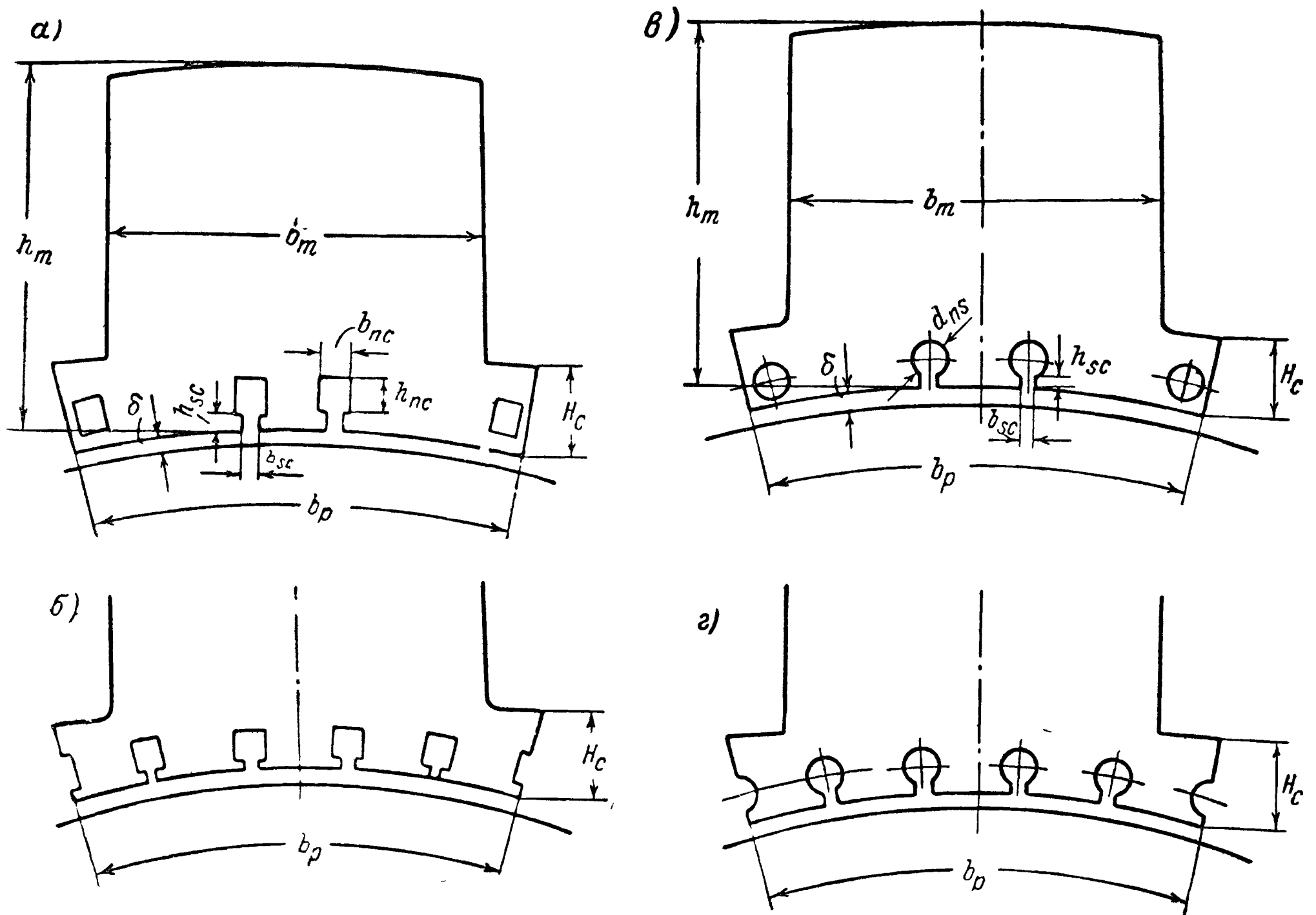
$$AW_m' = a\omega_m L_m' = a\omega_m \cdot 2(h_m - h_{nc}). \quad (96)$$

Расчет  $AW_{zc}$  рассмотрим для двух случаев: когда пазы для компенсационной обмотки круглой и когда они прямоугольной формы; в каждом из этих случаев возможны два варианта: первый — когда все пазы одинаковы, второй — когда по краям башмака имеются полупазы (фиг. 89).

Зубцовое деление по окружности, ограничивающей башмак со стороны зазора  $\delta$ :

$t_{1p}' \cong \frac{b_p}{z_c}$  — в случае полных пазов (фиг. 89, а и фиг. 89, в), по краям имеются половинки зубцов,

$t_{1p}'' = \frac{b_p}{z_c - 1}$  — в случае двух крайних полупазов (фиг. 89, б и фиг. 89, г).



Фиг. 89. Полюсные сердечники с пазами для компенсационной обмотки.

При прямоугольных компенсационных пазах ширину зубцов определяем по окружности, проведенной из центра якоря на расстоянии  $\frac{2}{3} h_{nc}$  от дна паза, где  $h_{nc}$  — высота компенсационного паза; ширина всех зубцов:

$$b_{pc}' = \frac{D_a + 2 \left( \delta + \frac{1}{3} h_{nc} + h_{sc} \right)}{D_a + 2\delta} b_p. \quad (97)$$

Здесь  $h_{sc}$  — высота прорези над компенсационными пазами. При круглых компенсационных пазах ширина зубцов по окружности, проведенной из центра якоря на расстоянии  $\frac{1}{6} d_{nc}$  от центра круглого паза (диаметром  $d_{nc}$ ) по направлению к ядру, будет:

$$b_{pc}'' = \frac{D_a + 2 \left( \delta + \frac{2}{3} d_{nc} + h_{sc} \right)}{D_a + 2\delta} b_p. \quad (98)$$

Сечение стали зубцов полюсного башмака с  $z_c$  прямоугольными полными пазами (фиг. 89, а)

$$S_{zc} = (b_{pc}' - z_c b_{nc}) l_m k_{Fe}'. \quad (99)$$

То же при прямоугольных пазах, но с крайними полупазами:

$$z_c = [b'_{pc} - (z_c - 1) b_{nc}] l_m k'_{Fe}. \quad (100)$$

То же при  $z_c$  круглых полных пазах (фиг. 89, в)

$$S_{zc} = [b''_{pc} - 0,94 z_c d_{nc}] l_m k'_{Fe}. \quad (101)$$

То же для  $z_c$  круглых пазов, из которых два крайние полупаза (фиг. 89, г):

$$S_{zc} = [b''_{pc} - 0,94 (z_c - 1) d_{nc}] l_m k'_{Fe}. \quad (102)$$

Значения  $k'_{Fe}$  — см. § 55;  $l_m$  — размер полюса по длине машины. По сечению  $S_{zc}$  проходит магнитный поток, превышающий  $\Phi_a$ , что мы учтем коэффициентом  $\sigma' = 1,05 \div 1,1$ . Тогда индукция в сечении  $S_{zc}$  будет:

$$B_{zc} = \frac{\Phi_a \sigma'}{S_{zc}}. \quad (103)$$

По этой индукции находим  $aw_{zc}$  на 1 см пути:

$$aw_{zc} = f(B_{zc})$$

для листовой стали, из которой сделаны сердечник и башмак главного полюса.

Практика показала, что можно находить  $AW_{zc}$ , умножая  $aw_{zc}$  на удвоенную высоту слоя  $2h_{nc} = 2d_{nc}$ :

$$AW_{zc} = aw_{zc} \cdot L_{zc} = aw_{zc} \cdot 2h_{nc}. \quad (104)$$

Суммой ( $AW_m' + AW_{zc}$ ) нужно заменить  $AW_m$  при вычислении ампервитков для случая компенсированной машины:

$$AW_m = AW_m' + AW_{zc}. \quad (105)$$

#### 61. Вычисление ампервитков для полюсных сердечников, включая полюсные башмаки, при наличии в сердечниках быстро насыщающихся участков или магнитных прокладок между сердечниками и ярмом

а) Задачу создания в полюсном сердечнике быстро насыщающегося участка можно конструктивно решить по-разному; на фиг. 90 представлено одно из таких решений. Во всех случаях задача сводится к тому, чтобы на некоторой длине  $h_{ms}$  полезное сечение сердечника уменьшилось настолько, чтобы при заданном магнитном потоке полюсов  $\Phi_0 = \alpha_i \Phi_m$  этот участок полностью насыщался (фиг. 90). Под  $\alpha_i$  понимаем здесь то наименьшее долевое значение потока, при котором должно уже иметь место насыщение.

При магнитном потоке  $\Phi_0 = \alpha_i \Phi_m$  индукция  $B_m$  в полном сечении сердечника полюса будет меньше индукции  $B_m$ , соответствующей потоку  $\Phi_m$ , в отношении:

$$\frac{B_m'}{B_m} = \frac{\alpha_i \Phi_m}{S_m} : \frac{\Phi_m}{S_m} = \alpha_i : 1,$$

т. е. получим:

$$B_m' = \alpha_i B_m. \quad (106)$$

Если магнитный поток  $\Phi_0$  на суженном участке  $S_i$  полюсного сердечника должен насытить этот участок, то при дальнейшем увеличении намагничивающих ампервитков индукция на суженном участке  $S_i$  будет возрастать по закону:

$$B_s = H + 4\pi J, \quad (107)$$

где  $J$  — интенсивность намагничивания, которую для обычных сортов листового стали, идущей на изготовление сердечников, можно принять равной  $J = 1650$ . Пренебрегая в выражении (107) значением  $H$  вследствие его малости, пишем

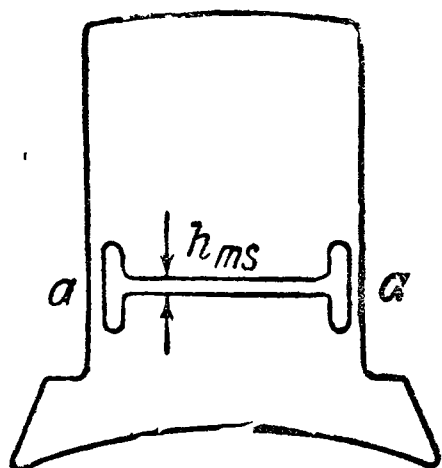
$$B_s \approx 4\pi J = 4\pi 1650 = 20700. \quad (107a)$$

Поэтому при магнитном потоке  $\Phi_0$  можем написать:

$$\frac{B_m'}{B_s} = \frac{\alpha_i B_m}{4\pi J} = \frac{S_i}{S_m}. \quad (108)$$

Принимая в среднем  $B_m = 14\,500$ , получаем

$$\frac{B_m'}{B_s} = \frac{\alpha_i 14\,500}{20\,700} = 0,7 \alpha_i,$$



или

$$\frac{S_i}{S_m} = 0,7 \alpha_i, \quad S_i = 0,7 \alpha_i S_m. \quad (109)$$

Фиг. 90. Полюсный сердечник с быстро насыщающимися участками.

Это выражение позволяет определить  $S_i$  при заданном  $\alpha_i$ .

При наличии вырезов в полюсных сердечниках расчет ампервитков  $AW_m$  для сердечников полюсов (включая полюсные башмаки) ведем отдельно для двух участков: для высоты выреза  $h_{ms}$  и для прочей высоты  $h_m - h_{ms}$ .

Сечение полюса по вырезу будет (фиг. 90).

$$S_{ms} = b_{ms} k'_{Fe} l_m,$$

где  $k'_{Fe}$  — по (78) в зависимости от толщины листов стали

Индукция в сечении  $S_{ms}$ .

$$B_{ms} = \frac{\Phi_m}{S_{ms}}. \quad (11^*)$$

Ампервитки  $aw_{ms}$  на 1 см пути берутся по соответствующей кривой намагничивания листовой стали полюсов; ампервитки на весь участок выреза высотой  $h_{ms}$  будут:

$$AW_{ms} = aw_{ms} L_{ms} = aw_{ms} \cdot 2h_{ms}. \quad (11)$$

Для прочего участка высоты полюсов (включая башмаки):

$$L_m' = 2(h_m - h_{ms}). \quad (11)$$

Ампервитки на этот участок

$$AW_m' = aw_m L_m', \quad (11)$$

где  $aw_m$  на 1 см берутся по индукции  $B_m$  из соответствующей кривой намагничивания

Полные ампервитки  $AW_m$  будут равны сумме.

$$AW_m = AW_m' + AW_{ms}.$$

Расчет  $AW_m$ , очевидно, будет с запасом, так как мы пренебрегли проницаемостью воздушного промежутка  $\delta_i$ .

Если вырезы сделаны только в половине полюсов, то

$$L_{ms} = h_{ms}; \quad L_m' = 2h_m - h_{ms}. \quad (11)$$

б) Получить магнитноустойчивую кривую намагничивания (или характеристику генераторного холостого хода) можно, устраивая между ярмом и полюсом



ными сердечниками прокладки из специальной магнитной стали (кобальтовой или хромовой), имеющей большую коэрцитивную силу (фиг 91). При таких прокладках участок магнитного пути по высоте полюсов с башмаками разбиваем, как в п. «а», на два, для каждого из них потребные ампервитки вычитаем отдельно.

При магнитной прокладке высотой  $h_\mu$  имеем для остальной части длину

$$L_m' = 2(h_m - h_\mu)$$

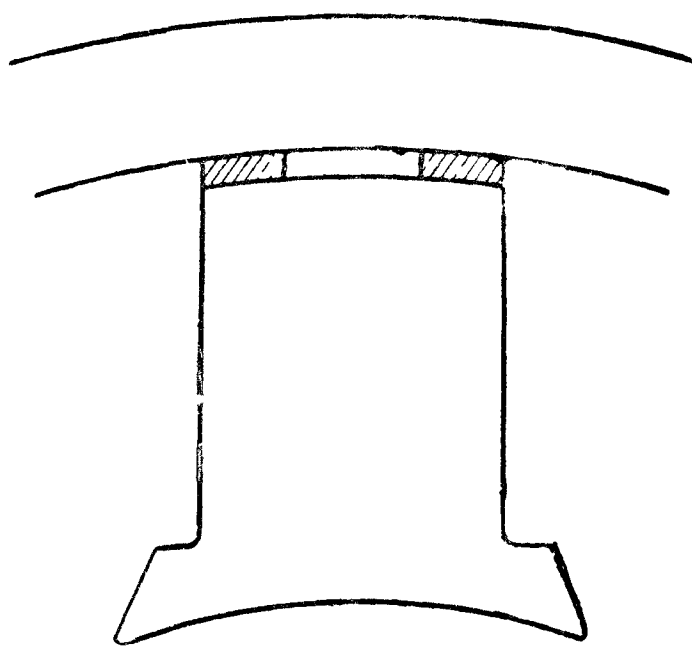
Ампервитки на сердечник полюсов, не считая прокладок, будут

$$AW_m' = a\omega_m L_m', \quad (116)$$

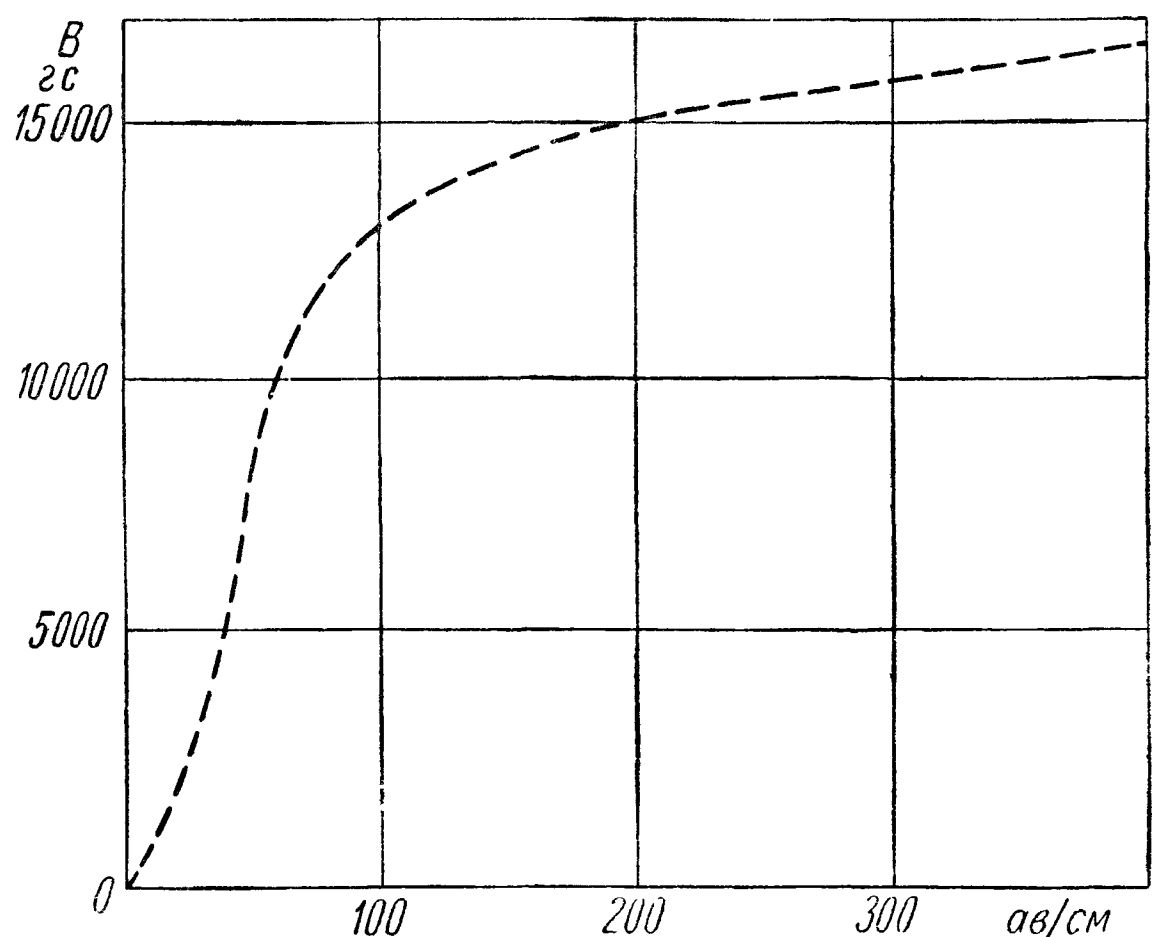
где ампервитки  $a\omega_m$ , как и раньше, определяются по кривым намагничивания стали, из которой сделаны сердечники

Длина пути магнитного потока в прокладках

$$L_{m\mu} = 2h.$$



Фиг. 91. Полюс с прокладками из специальной стали.



Фиг 92. Кривая намагничивания стали марки ХВП по данным завода «Электросила»

Ампервитки на 1 см пути  $a\omega_\mu$  для прокладок определяются по кривой намагничивания магнитного материала прокладок. На полную длину прокладок потребное число ампервитков напишется так:

$$AW_\mu = a\omega_\mu \cdot 2h_\mu.$$

Таким образом, суммарные ампервитки на сердечники полюсов (включая полюсные башмаки) будут:

$$AW_m = AW_m' + AW_\mu. \quad (117)$$

На фиг 92 приведена по данным испытаний завода «Электросила» кривая намагничивания магнитной стали марки ХВП, применяемой заводом для магнитных прокладок

При устройстве магнитных прокладок только над половиной полюсов получим

$$L_\mu = h_\mu, \quad (118)$$

$$L_m' = 2h_m' - h_\mu. \quad (119)$$

## 62. Вычисление коэффициента магнитного рассеяния главных полюсов ( $\sigma_0$ )

а) Для вычисления  $\sigma_0$  при холостом ходе машины генератором воспользуемся формулой (18):

$$\sigma_0 = 1 + \frac{\Phi_{s0}}{\Phi_a}.$$

Как видим, вопрос сводится к определению потока рассеяния  $\Phi_{s0}$ . Схематизируя картину потоков рассеяния, можно разбить их на две группы: внутренние потоки рассеяния  $\Phi'_{s0}$  и внешние, или торцевые, потоки рассеяния  $\Phi''_{s0}$ :

$$\Phi_{s0} = \Phi'_{s0} + \Phi''_{s0}. \quad (120)$$

Первые проходят в плоскостях, перпендикулярных к валу машины, и могут быть названы поперечными (фиг. 73), вторые — в плоскостях, проведенных через ось полюсов и ось вала машины, и являются продольными.

Для подсчета потоков нужно строить картину их распределения и определять проводимости путей, по которым они замыкаются. Для практических целей можно пользоваться упрощенным приемом Арнольда. А именно: разбиваем потоки  $\Phi'_{s0}$  и  $\Phi''_{s0}$  на частичные потоки рассеяния, замыкающиеся соответственно (фиг. 73):

- 1) между смежными полюсными башмаками — потоки  $\Phi'_{sp}$  и  $\Phi''_{sp}$ ,
- 2) » » » сердечниками — потоки  $\Phi'_{sm}$  и  $\Phi''_{sm}$ ,
- 3) » полюсными сердечниками и ярмом — потоки  $\Phi'_{sj}$  и  $\Phi''_{sj}$

Таким образом, пишем:

$$\Phi'_{s0} = 2(\Phi'_{sp} + \Phi'_{sm} + \Phi'_{sj}), \quad (121)$$

$$\Phi''_{s0} = 2(\Phi''_{sp} + \Phi''_{sm} + \Phi''_{sj}) \quad (122)$$

Коэффициент 2 в формуле (121) учитывает симметрию потоков рассеяния  $\Phi'_{s0}$  относительно плоскости, проходящей через ось полюса и ось машины.

Коэффициент 2 в формуле (122) учитывает симметрию потоков  $\Phi''_{s0}$  относительно плоскости 2, проведенной через ось полюса перпендикулярно к оси машины. При проведении потоков рассеяния мы на первом этапе принимаем, что они выходят из поверхностей под углом  $90^\circ$ , что, как увидим дальше, неверно.

Для каждого из частичных потоков рассеяния можно написать:

$$\Phi_{sx} = F_{sx} \lambda_{sx}, \quad (123)$$

где  $F_{sx}$  — м. д. с., создающая поток  $\Phi_{sx}$ , а  $\lambda_{sx}$  — проводимость пути, по которому этот поток проходит. Так как м. д. с. вдоль полюсов увеличивается по прямолинейному закону от нулевого значения у ярма до значения

$$F_{m0} = 0,4 \pi (AW_{a0} + AW_{z0} + AW_{\delta 0}) \quad (124)$$

у полюсного башмака, то для каждого из частных потоков рассеяния будет свое значение  $F_{mx}$ , которое мы будем выражать через  $F_m$  с соответствующим коэффициентом  $\beta_x$ :

$$F_{sx} = F_m \beta_x. \quad (125)$$

Тогда выражение (123) можно переписать так.

$$\Phi_{sx} = F_{sx} \lambda_{sx} = F_m \beta_x \lambda_{sx} = F_m A_{sx}, \quad (123a)$$

где

$$A_{sx} = \beta_x \lambda_{sx} \quad (126)$$

учитывает проводимость  $\lambda_{sx}$  для потока  $\Phi_{sx}$ , а также уменьшение для него значения н. с. Заметим, что, так как в (126) входят ампервитки на пару полюсов, мы учитываем потоки рассеяния сразу на пару полюсов.

Таким образом, суммарный поток магнитного рассеяния  $\Phi_{s0}$  можно представить так:

$$\begin{aligned} \Phi_{s0} &= \Phi'_{s0} + \Phi''_{s0} = 2(\Phi'_{sp} + \Phi'_{sm} + \Phi'_{sj}) + 2(\Phi''_{sp} + \Phi''_{sm} + \Phi''_{sj}) = \\ &= 2F_m \sum A'_{sx} + 2F_m \sum A''_{sx}, \\ \Phi_{s0} &= F_m \cdot 2(\sum A'_{sx} + \sum A''_{sx}) = F_m \cdot 2A_s, \end{aligned} \quad (127)$$

где

$$A_s = \sum A'_{sx} + \sum A''_{sx} \quad (128)$$

Формулы для вычисления  $A'_{sx} = \beta'_x \lambda'_{sx}$  и  $A''_{sx} = \beta''_x \lambda''_{sx}$  приведены в табл. 11 для машин с небольшим числом полюсов, полюсы которых (фиг. 73)

Таблица 11.

Формулы для вычисления проводимости  $A_s$ 

Для внутренних потоков рассеяния	Для внешних потоков рассеяния
1 случай Машина с небольшим числом полюсов, фиг. 73	
$A'_{sp} = \frac{a_1 l_p}{L_1}$	$A''_{sp} = \frac{S}{L_2}$
$A'_{sm} = \frac{h_3}{H_m} \frac{a_3 l_m}{L_3}$	$A''_{sm} = \frac{h_3}{H_m} \frac{b_m}{L_4}$
$A'_{sj} = \frac{l_m}{H_m} \sum \frac{a_{5x} h_{5x}}{L_{5x}}$	$A''_{sj} = \frac{b_m}{\pi} \frac{\sqrt{h_1^2 + b_1^2}}{H_m} \frac{180^\circ}{\alpha}$
$L_1, L_3, L_{5x}$ — по фигуре	$L_2 = L_1 + \pi r, \quad L_4 = L_3 + \frac{b_m}{4} \pi$

## 2 случай Машина с большим числом полюсов, фиг. 74

$A'_{sp} = \frac{a_1 l_p}{L_1}$	$A''_{sp} = \frac{S_p}{L_2}$
$A'_{sm} = \frac{H_m l_m}{2L_3}$	$A''_{sm} = \frac{H_m b_m}{2L_4}$
$A'_{sj} = 0$	$A''_{sj} = 0$
$L_3 = \frac{\tau_1 - \tau_2}{2} - b_m$	$L_2$ и $L_4$ — как и в случае 1
$A'_s = A'_{sp} + A'_{sm} + A'_{sj}$	$A''_s = A''_{sp} + A''_{sm} + A''_{sj}$

стоят под большими углами друг к другу, и для машин с большим числом полюсов, в которых полюсы стоят под небольшими углами друг к другу, т. е. почти параллельны, а потому в них потоки  $\Phi'_{sj}$  и  $\Phi''_{sj}$  практически отсутствуют (фиг. 74). Обозначения отдельных размеров ясны из фигур, фиг. 93, а, б иллюстрирует формулу для  $A''_{sj}$ .

Вычислив  $\Phi_{s0}$ , можно найти  $\sigma_0$

$$\sigma_0 = 1 + \frac{\Phi_{s0}}{\Phi_{a0}} = 1 + \frac{F_{m0}}{\Phi_{a0}} 2A_s \quad (129)$$

Подставляя сюда выражения для  $F_{m0}$  (124) и  $\Phi_a$ , получаем

$$\sigma_0 = 1 + \frac{0.4 \pi (AW_{a0} + AW_{z0} + AW_{\delta 0})}{B_{\delta 0} b_{\delta} l_{\delta}} 2A_s. \quad (129a)$$

Как вытекает из формулы (129а), коэффициент  $\sigma_0$  зависит от ампервитков на полюсах. Если кривая намагничивания для зубцов и якоря близка к прямой, то  $\Phi_{s0}$  увеличивается пропорционально  $\Phi_a$ , и  $\sigma_0$  остается без изменения. С увеличением насыщения зубцов и якоря поток рассеяния  $\Phi_{s0}$  растет быстрее,

чем  $\Phi_a$ , а потому  $\sigma_0$  возрастает. Этим изменением  $\sigma_0$  при расчете магнитной цепи при холостом ходе обычно пренебрегают, считая, что  $\sigma_0$  остается одним и тем же при всех значениях  $\Phi_a$ .

При расчете сечения полюсов необходимо приближенно задаться значением  $\sigma_0$ , так как  $\sigma_0$  можно вычислить лишь тогда, когда размеры машины известны. Если расхождение между предварительно принятым значением  $\sigma_0$  и его вычисленным значением после установления размеров машины получается существенным, то  $\sigma_0$  необходимо соответственно изменить.

Выражение (129а) можно преобразовать так:

$$\sigma_0 = 1 + \frac{0,4\pi \left(1 + \frac{AW_{z0} + AW_{a0}}{AW_{\delta 0}}\right) AW_{\delta 0}}{B_{\delta 0} b_{\delta} l_{\delta}} 2A_s \quad (130)$$

Подставляем выражение для  $AW_{\delta 0}$  из (71)

$$AW_{\delta 0} = 1,6 k_{\delta} \delta B_{\delta 0} = 2 \cdot 0,8 B_{\delta 0} k_{\delta} \delta = \frac{2}{0,4\pi} B_{\delta 0} k_{\delta} \delta$$

и вводим обозначение

$$k_z = 1 + \frac{AW_{z0} + AW_{a0}}{AW_{\delta 0}}, \quad (131)$$

тогда окончательно имеем:<sup>1</sup>

$$\sigma_0 = 1 + \frac{2\delta k_{\delta} k_z}{b_{\delta} l_{\delta}} 2A_s = 1 + \frac{4\delta k_{\delta} k_z}{b_{\delta} l_{\delta}} A_s. \quad (132)$$

б) Оссанна дал упрощенную формулу для  $\sigma_0$ , приняв, что потоки рассеяния можно разбить на две группы. одну, для которой проводимости  $\lambda_{s1}$  зависят, в основном, от полной длины машины  $l_{\Sigma}$ , и вторую, для которой проводимости  $\lambda_{s2}$  зависят от диаметра якоря и числа пар полюсов, тогда можем написать:<sup>2</sup>

$$\lambda_{s1} = C_s' l_{\Sigma}, \quad \lambda_{s2} = C_s'' \frac{D}{p} \quad (133)$$

Пользуясь ранее полученной нами формулой (132), пишем

$$\sigma_0 = 1 + \frac{4\delta k_{\delta} k_z}{b_{\delta} l_{\delta}} \left( C_s' l_{\Sigma} + C_s'' \frac{D}{p} \right) \quad (134)$$

<sup>1</sup> Формула отличается от формулы Арнольда, так как Арнольд вводит  $0,4\pi$  в проводимости

<sup>2</sup> Обоснование опускаем, его можно найти у Оссанна в Starkstromtechnik, Справочник R z i h a und S c i d e n e r, том 1, издание 1922 г



Это можно преобразовать, вынеся из скобок  $\frac{Dl_{\Sigma}}{p}$  и заменив  $b_{\delta}$  через  $\alpha_{\delta} \frac{\pi D}{2p}$ .

$$\sigma_0 = 1 + \frac{4\delta k_{\delta} k_z}{\alpha_{\delta} \left(\frac{\pi D}{2p}\right) l_{\delta}} \cdot \frac{Dl_{\Sigma}}{p} \left(C_s' \frac{p}{D} + \frac{C_s''}{l_{\Sigma}}\right).$$

Принимая  $\alpha_{\delta} \pi \approx 2$  и  $l_{\delta} = l_{\Sigma}$ , получаем:

$$\sigma_0 = 1 + 4\delta k_{\delta} k_z \left(C_s' \frac{p}{D} + \frac{C_s''}{l_{\Sigma}}\right),$$

Обозначая

$$\delta k_{\delta} k_z = \delta'', \quad 4C_s' = C_1, \quad 4C_s'' = C_2, \quad (135)$$

получим формулу Оссанна:

$$\sigma_0 = 1 + \delta'' \left(C_1 \frac{p}{D} + \frac{C_2}{l_{\Sigma}}\right). \quad (136)$$

В среднем, по Оссанна, можно принять:

$$C_1 = 3,0, \quad C_2 = 1,3, \quad (137)$$

тогда

$$\sigma_0 = 1 + \delta'' \left(3,0 \frac{p}{D} + \frac{1,3}{l_{\Sigma}}\right). \quad (136a)$$

Если подставить вышеуказанные средние значения  $k_{\delta} = 1,2$  и  $k_z = 1,3$ , то

$$\delta'' \approx 1,56 \delta,$$

$$\sigma_0 \approx 1 + \delta \left(4,7 \frac{p}{D} + \frac{2,0}{l_{\Sigma}}\right), \quad (138)$$

где все размеры в сантиметрах. Эта формула весьма удобна для предварительного ориентировочного определения значения  $\sigma_0$ .

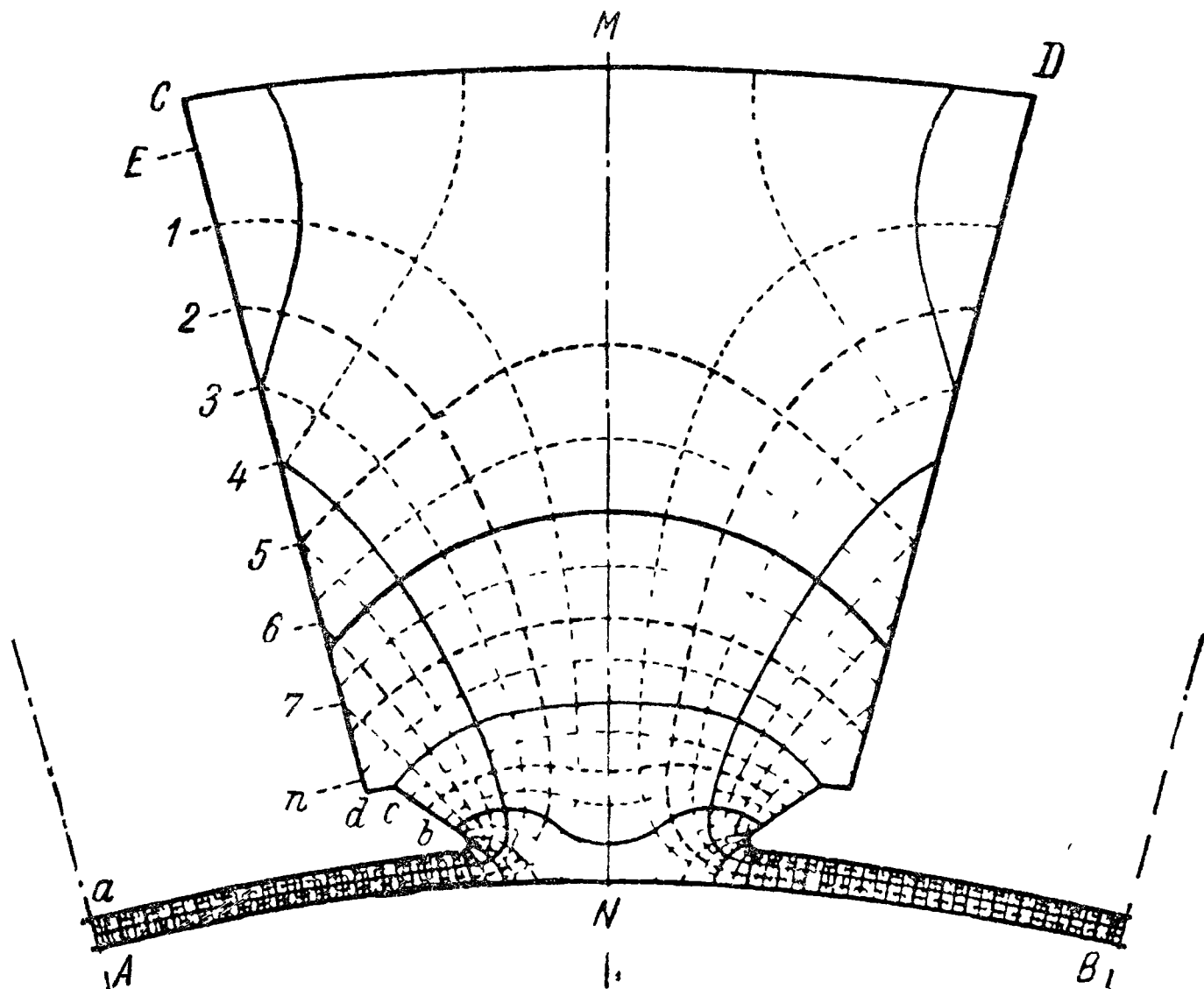
в) В п. «а» при вычерчивании картины распределения магнитного рассеяния полюсов мы проводили линии магнитного потока перпендикулярно к боковым поверхностям полюсов, на которых расположены намагничивающие катушки. В действительности же следовало учесть, что намагничивающая сила, которая создает потоки рассеяния, распределяется по цилиндрической поверхности полюсов по линейному закону, возрастая от нуля у ярма до значения  $F = 0,4\pi (AW_{\delta} + AW_z + AW_a)$  у полюсного башмака.

Вследствие этого боковая поверхность полюсных сердечников, не являясь равнопотенциальной поверхностью, пересекается магнитными линиями не под прямыми углами. По этой причине равнопотенциальные поверхности, разнящиеся друг от друга на одинаковую величину потенциала, делят боковую поверхность сердечника (при линейном распределении вдоль нее магнитного потенциала) на равные части. Углы, под которыми равнопотенциальные поверхности пересекают боковую поверхность сердечника полюса, а равно углы, под которыми из боковой поверхности выходят магнитные линии, отличаются от  $90^\circ$ , в то же время обе системы линий — магнитных и уровней — остаются взаимно-перпендикулярными.

На фиг. 94 приведено указанное уточненное построение поперечных потоков рассеяния  $\Phi'_{\Sigma 0}$  для одного частного случая. Под полюсом единичные трубки (§ 51) разбиты на 4 части, дальше на 8 частей. Единичные трубки ограничены более толстыми линиями. Тонкие линии делят трубки на 2, прерывистые — на 4, пунктирные — на 8 частей. Такие же обозначения приняты и для равнопотенциальных поверхностей.

Средняя линия между полюсами  $MN$  имеет одинаковый потенциал с поверхностью якоря  $AB$  и с поверхностью ярма  $CD$ . Вследствие этого картина потоков получается симметричной относительно линии  $MN$ . Таким образом, задача построения единичных трубок и поверхностей уровня сводится к построению их в пространстве между равнопотенциальными поверхностями, одной —  $ECMNA$  и другой —  $ndcba$ .

Точка  $C$  соответствует верхнему краю полюсной катушки, точка  $n$  — ее нижнему краю. Разбив отрезок  $En$  на 8 равных частей, мы получаем точки  $1—7$ , в которых должны оканчиваться равнопотенциальные поверхности, соответствующие каждая  $1/8$  части разности магнитных потенциалов  $F_m$  (124).



Фиг 94 Поперечные потоки магнитного рассеяния

Построение начинаем с нанесения единичных трубок и поверхностей уровня под полюсом, как было указано выше (§ 51). Продолжая построение равнопотенциальных поверхностей, нужно помнить, что они оканчиваются на линии  $En$ , притом в строго фиксированных точках  $1—7$ . Равнопотенциальная поверхность, оканчивающаяся в точке  $1$ , вблизи основания полюса, сечет линию  $En$  почти под прямым углом. Угол пересечения следующих равнопотенциальных поверхностей с линией  $En$  становится постепенно все острее и острее. При построении нужно добиваться того, чтобы магнитные линии и равнопотенциальные поверхности пересекались друг с другом под углом  $90^\circ$ , причем в каждом из получающихся четырехугольников должно соблюдаться равенство  $\delta_x = b_x$ . У поверхности  $En$  квадратичная картина исчезает; кроме того, у точек  $N, M, c, d$ , вообще всюду, где имеем углы, четырехугольники переходят в пятиугольники, независимо от того, как далеко идет подразделение единичных трубок на части.

Поперечный поток рассеяния  $\Phi'_{s0}$  на половину полюса, как видно из фиг 94, состоит из 1,67 единичной трубки. На весь полюс, таким образом, имеем:

$$m_s' = 1,67 \cdot 2 = 3,34 \text{ единичной трубки.}$$

Для полезного потока выше (§ 54) мы имели

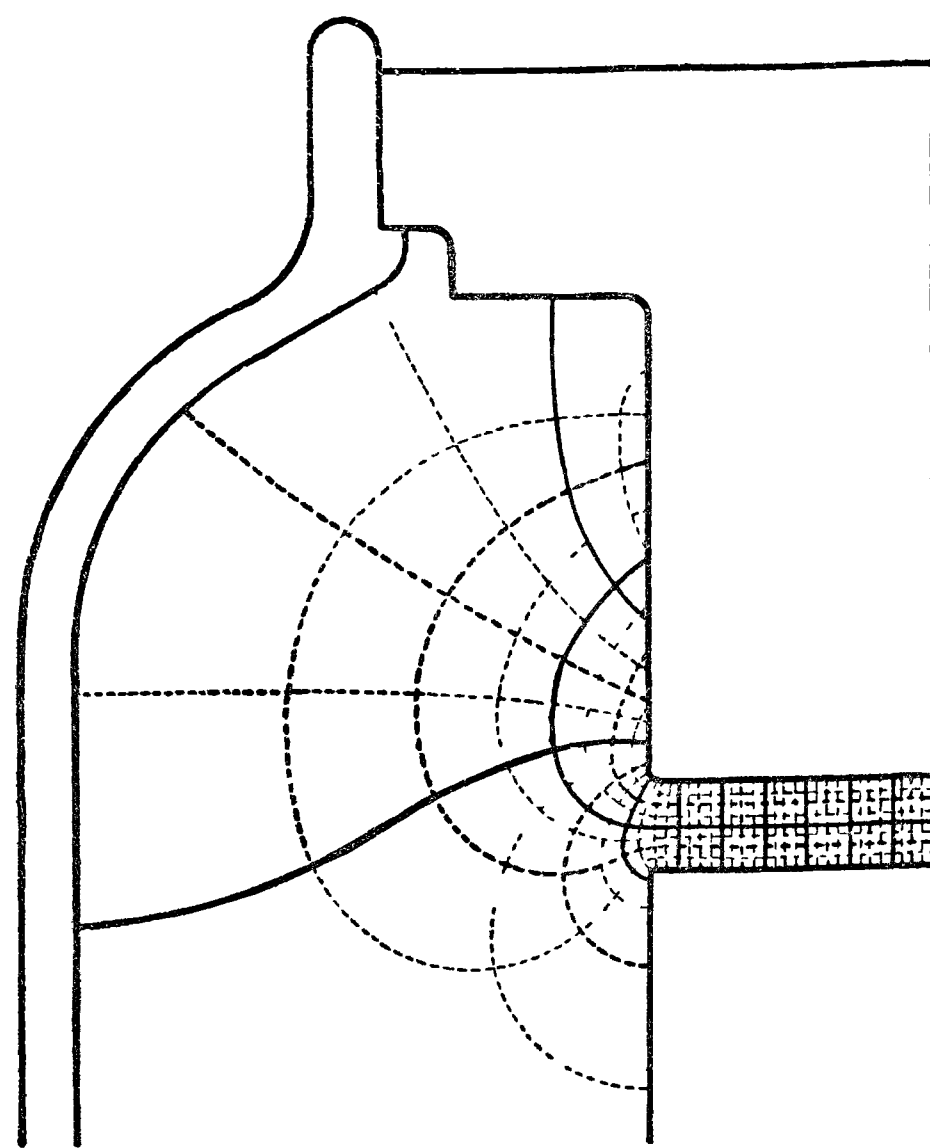
$$m_\delta = 29,9 \text{ единичных трубок.}$$

Предполагая размер полюса  $l_m$  в осевом направлении машины равным длине полюсного башмака  $l_p$ , можем написать.

$$\frac{\Phi'_{s0}}{\Phi_a} = \frac{3,34}{29,9} = 0,1115,$$

т. е. внутренние потоки рассеяния  $\Phi'_{s0}$  оставляют около 11% от полезного потока  $\Phi_a$ . Если  $l_m \neq l_p$ , то полученный результат нужно умножить на отношение  $l_m/l_p$ .

Учет только что изложенным способом внешних потоков рассеяния  $\Phi''_{s0}$  значительно сложнее. Если машина имеет подшипниковые щиты без вырезов, и щиты находятся на расстоянии, меньшем половины полюсного деления, то картину распределения внешних потоков рассеяния можно вычертить на продольном разрезе машины, как это сделано на фиг 95. При вычерчивании этой картины сделано предположение, что размер полюсного сердечника в направлении, перпендикулярном к чертежу, бесконечно велик, такое же предположение делается относительно диаметра якоря, так как только при таких предположениях картину распределения потока  $\Phi''_{s0}$  можно свести к плоской задаче.



Фиг 95. Картина распределения внешних потоков рассеяния

Для примера, представленного на фиг. 95, потоки утечки на одну сторону оставляют  $\frac{6}{8}$  единичной трубки на 1 см ширины полюса  $b_m$ , а на обе стороны число единичных трубок на 1 см ширины полюса будет.

$$m_s'' = 2 \cdot \frac{6}{8} = \frac{6}{4} = 1,5.$$

Поэтому в нашем примере

$$\frac{\Phi''_{s0}}{\Phi_a} = \frac{m_s'' b_m}{m_\delta l_\delta} = \frac{1,5}{29,9} \frac{b_m}{l_\delta} \approx 0,05 \frac{b_m}{l_\delta}$$

При отсутствии подшипниковых щитов и при расстоянии их от сердечников полюсов, превышающем  $\tau$ , можно принять, что их нет, и потоки рассеяния направлять к ярму.

Построение, как видим, громоздкое и, вследствие необходимости делать ряд огрубляющих предположений, дает результаты не более точные, чем ранее изложенный приближенный способ Арнольда.

---

---

### ГЛАВА III

## ГЛАВНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ ХОЛОСТОМ ХОДЕ

### А. ТИПЫ ЯКОРЕЙ И ИХ ОБМОТОК МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

#### 63. Исходное подразделение якорных обмоток машин постоянного тока

Первые машины постоянного тока строились с разомкнутыми якорными обмотками. Впервые замкнутая якорная обмотка машины постоянного тока была осуществлена Пачинотти на цилиндрическом (кольцевом) якоре в 1860 г., но она привлекла к себе внимание только после вторичного изобретения ее Граммом в 1870 г. Замкнутая якорная обмотка стала быстро входить в широкую практику и постепенно вытеснять разомкнутые якорные обмотки, хотя еще в течение ряда лет делались неоднократные попытки усовершенствовать и применять разомкнутые якорные обмотки. Однако после изобретения Гефнером-Альтенеком в 1872 г. барабанной замкнутой якорной обмотки и после уразумения преимуществ выполнения ее на зубчатом якоре (который, кстати, впервые был применен еще Пачинотти в 1860 г. в его кольцевой машине) разомкнутые якорные обмотки постепенно вышли из употребления, и ныне машины постоянного тока строят только с барабанными замкнутыми якорными обмотками, которые укладывают в пазы зубчатого цилиндрического якоря.

Подразделение якорных обмоток машин постоянного тока на разомкнутые обмотки и на замкнутые обмотки является, таким образом, первым, исходным подразделением их.

#### 64. Подразделение замкнутых якорных обмоток машин постоянного тока по типам якорей

Возможны два принципиально различных выполнения замкнутой якорной обмотки на цилиндрическом якоре. Первое выполнение — в виде обмотки, охватывающей наружную и внутреннюю поверхности полого цилиндрического якоря. Последний делался небольшой осевой длины при относительно большом диаметре, вследствие чего получил название кольцевого якоря, а осуществляемые на таком якоре замкнутые обмотки стали называть **кольцевыми замкнутыми якорными обмотками**.

Второе выполнение замкнутой якорной обмотки на цилиндрическом якоре состоит в расположении ее по наружной поверхности цилиндрического якоря, в этом случае якорь стали называть барабанным якорем, а его обмотки — **барабанными замкнутыми якорными обмотками**. При достаточно большом диаметре барабанный якорь делают, так же как и кольцевой, в виде полого цилиндра, причем осевая длина последнего обычно значительно меньше его диаметра, а потому он по существу тоже является кольцевым; таким образом, название цилиндрического якоря кольцевым или барабанным связывается ныне не с его формой, а с характером укладываемой



на якоре замкнутой якорной обмотки: снаружи и внутри полого цилиндра — **рольцевой якорь**, или только снаружи — **барабанный якорь**.

Позднее появился еще один тип якоря — **дисковый якорь**, однако он не имел влияния на ход развития машин постоянного тока, так же как и осуществленные на таком якоре **дисковые замкнутые якорные обмотки**. Это одно из трех возможных осуществлений замкнутой якорной обмотки, притом наименее удачное.

Итак, замкнутые якорные обмотки можно подразделить по типам якорей на: 1) кольцевые, 2) барабанные, 3) дисковые.

## 55. Роль кольцевых и барабанных замкнутых якорных обмоток в ходе развития машин постоянного тока

В настоящее время эл. машины постоянного тока строят исключительно барабанными замкнутыми якорными обмотками, которые выполняются разных типов, причем некоторые из последних возникли применительно к барабанному якору. Отсюда напрашивается вывод, что типы замкнутых якорных обмоток машин постоянного тока нужно изучать на барабанном якоре. Однако внимательное и всестороннее изучение вопроса показывает, что все имеющиеся типы замкнутых якорных обмоток могут быть осуществлены и на кольцевом якоре, причем на последнем они приобретают более наглядный вид, а потому легче ухватываются их принципиальные различия и особенности. Кроме того, переход от любого типа замкнутой якорной обмотки, выполненной на кольцевом якоре, к такой же обмотке барабанного якоря может быть осуществлен чрезвычайно простым способом, не требующим умственного напряжения. Вследствие сказанного изучение замкнутых якорных обмоток целесообразно начинать с кольцевого якоря, несмотря на то, что он ныне утратил практическое значение. За кольцевым якорем сохраняется, таким образом, не только первенство историческое, т. е. по времени возникновения, но и логическое, в теории замкнутых якорных обмоток.

## 56. Подразделение замкнутых якорных обмоток по типам их выполнения

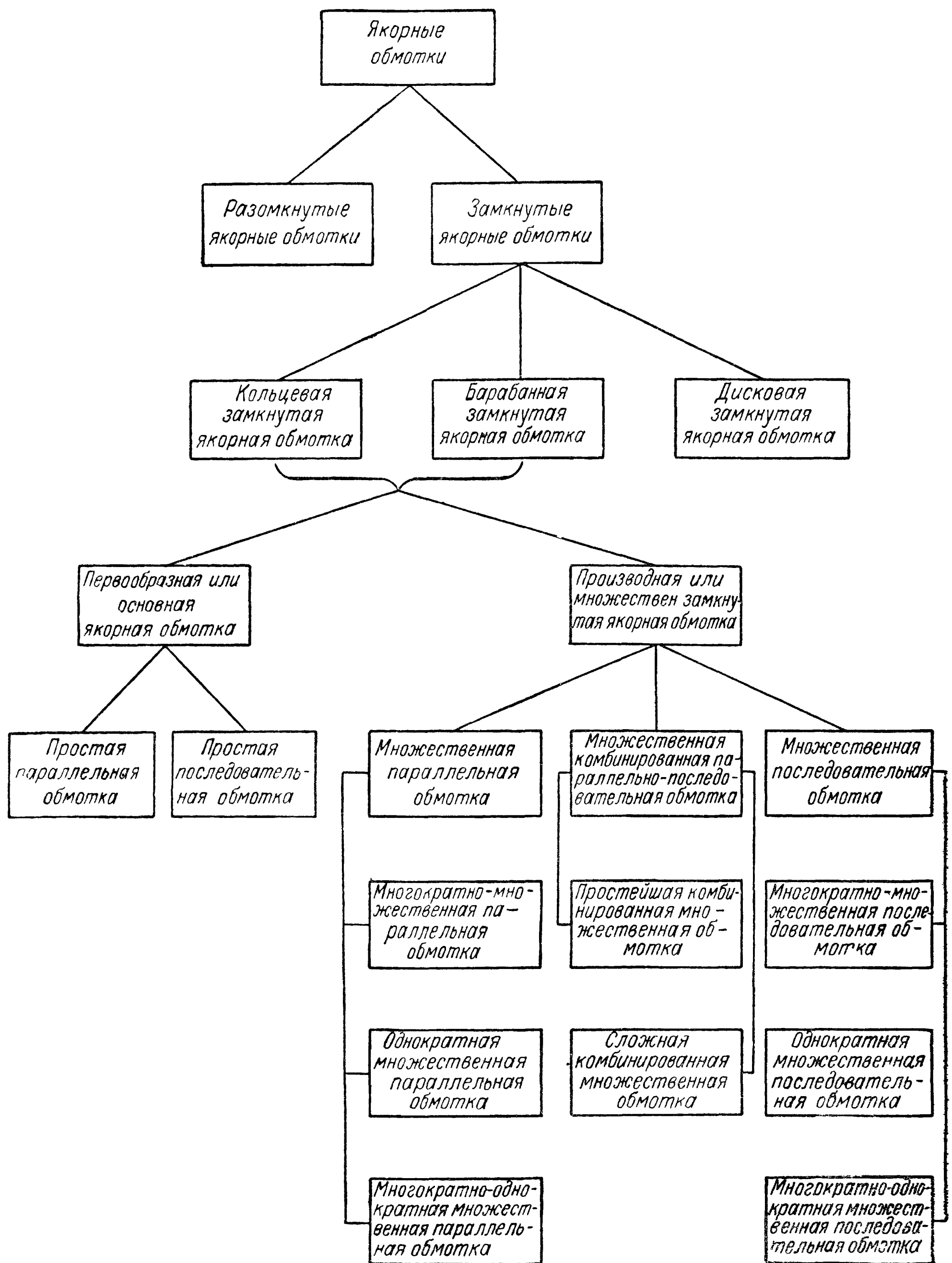
Кольцевые замкнутые якорные обмотки машин постоянного тока можно подразделить на 1) первообразные, или основные, и 2) производные (от основных), или множественные якорные обмотки.

Основных кольцевых замкнутых якорных обмоток машин постоянного тока, принципиально различных по выполнению, только две: 1) простая параллельная замкнутая якорная обмотка и 2) простая последовательная замкнутая якорная обмотка. Термин «замкнутая» в дальнейшем часто будемпускать, памятуя, что речь идет о замкнутых якорных обмотках.

Путем устройства на кольцевом якоре нескольких простых параллельных обмоток получают множественные параллельные обмотки кольцевого якоря, которые можно подразделить на: 1) многократные множественные параллельные обмотки, 2) однократные множественные параллельные обмотки, 3) многократно-однократные множественные параллельные обмотки.

Точно так же, устраивая на кольцевом якоре несколько простых последовательных обмоток, можно получить множественные последовательные обмотки кольцевого якоря. Они аналогично подразделяются на: 1) многократные множественные последовательные обмотки, 2) однократные множественные последовательные обмотки, 3) многократно-однократные множественные последовательные обмотки.

Наконец, комбинируя на кольцевом якоре параллельные обмотки с последовательными обмотками, можно получить комбинированные множественные параллельно-последовательные обмотки, которые могут быть 1) простыми и 2) сложными.



Фиг. 96 Схема классификации якорных обмоток машин постоянного тока

Из любой кольцевой якорной обмотки можно получить, как было указано выше, соответствующую ей барабанную якорную обмотку. Таким образом, указанное подразделение кольцевых якорных обмоток сохраняет силу и для барабанных якорных обмоток

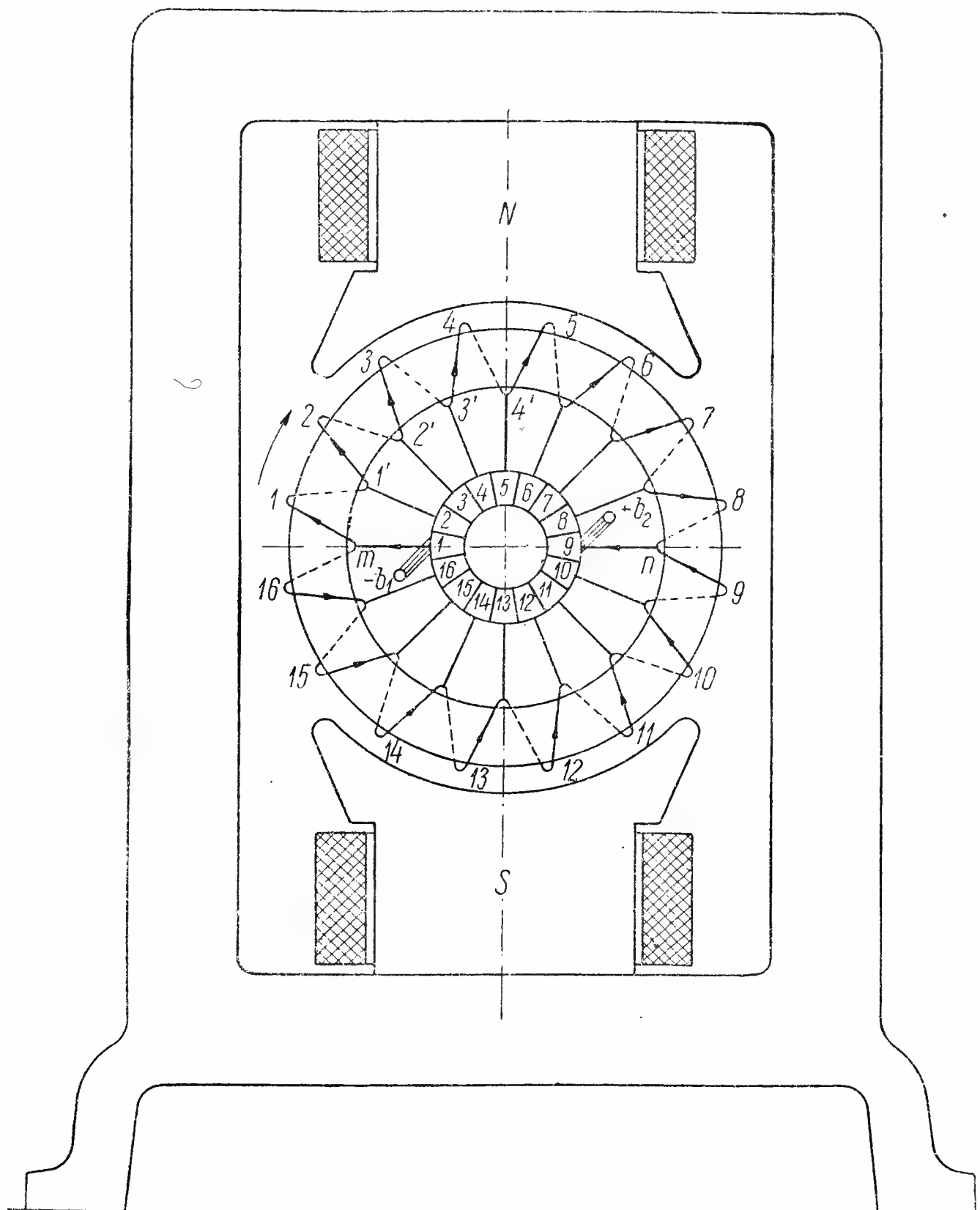
Классификационная схема якорных обмоток машин постоянного тока дана на фиг. 96. Сложная, на первый взгляд, классификация легко усваи-

вается после изучения кольцевых якорных обмоток. Каждая из позиций последней ступени классификации, данной на фиг. 96, допускает подразделение по разновидностям; о них речь будет в дальнейшем.

## Б. ПЕРВООБРАЗНЫЕ, ИЛИ ОСНОВНЫЕ, ЗАМКНУТЫЕ ОБМОТКИ КОЛЬЦЕВОГО ЯКОРЯ И ИНДУКТИРУЕМАЯ В НИХ Э. Д. С.

### 67. Простейшее выполнение замкнутой обмотки кольцевого якоря

Первое требование, предъявляемое к кольцевой замкнутой якорной обмотке, заключается в самом названии обмотки: она должна быть замкнутой, т. е. представлять собой замкнутую эл. цепь. Второе требование заклю-



Фиг. 97. Спиральная обмотка кольцевого якоря двух-полюсной машины постоянного тока.

ается в том, чтобы при всех угловых расположениях якоря относительно магнитных полюсов машины обмотка обладала, по возможности, одними и теми же свойствами.

Простейшей замкнутой якорной обмоткой кольцевого якоря, удовлетворяющей этим требованиям, является замкнутая спираль, равномерно навитая на кольцевой якорь (фиг. 97). Такую обмотку можно мыслить себе как ряд последовательно соединенных между собой витков, каждый из которых состоит: 1) из проводника, расположенного на наружной поверхности полого цилиндрического якоря; его мы будем называть *наружным*, или *активным* проводником обмотки якоря; 2) из такого же

проводника, расположенного на внутренней поверхности полого цилиндрического якоря; его будем называть *внутренним*, или *мертвым*, проводником обмотки якоря, 3) из частей обмотки, расположенных на обоих торцах якоря, т. е. на основаниях полого цилиндрического якоря; их будем называть *лобовыми частями обмотки*. Лобовых частей у витка обмотки две: передняя и задняя лобовая часть обмотки. Пояснения названий даны ниже.

Из сказанного вытекает, что под витком рассматриваемой простейшей спиральной обмотки кольцевого якоря понимается тот простейший замкнутый контур, который получился бы, если бы мы соединили вместе торцы двух смежных (активного и мертвого) проводников рассматриваемой якорной обмотки.

Активные проводники якорной обмотки условимся нумеровать последовательно по часовой стрелке, дав № 1 какому-нибудь из них (фиг. 97). Такую же последовательную нумерацию, но со штрихами, дадим внутренним, или мертвым, проводникам нашей обмотки, при этом № 1' назовем тот мертвый проводник, который соединяется при помощи задней лобовой соединительной части обмотки с задним торцом активного проводника с тем же номером без штриха.

Передние торцы активных проводников присоединим к пластинам коллектора, дав те же номера, что и активным проводникам.

Число коллекторных пластин  $K$  равно в нашем случае числу  $s$  активных проводников обмотки:

$$K = s. \quad (139)$$

Часть обмотки, лежащую между двумя смежными при обходе обмотки присоединениями к коллектору, будем называть *элементом обмотки*, или *секцией обмотки*. В рассматриваемой обмотке (фиг. 97) секция обмотки состоит из одного витка и содержит только один активный проводник, — одновитковая секция.

Описанную простейшую замкнутую спиральную якорную обмотку кольцевого якоря будем мыслить вставленной в простейшую магнитную систему, состоящую из двух магнитных полюсов противоположных полярностей, — северный магнитный полюс  $N$  и южный магнитный полюс  $S$ , соединенных друг с другом снаружи ярмом магнитной системы (в дальнейшем ярма рисовать не будем) <sup>1</sup>

Дугу наружной окружности якоря, соответствующую одному полюсу, в нашем случае дугу

$$\tau = \frac{\pi D_a}{2}, \quad (140)$$

где  $D_a$  — диаметр наружной окружности якоря, будем называть *полюсным делением якоря*.

Проводя из центра вала машины радиусы, касательные к концам полюсного башмака, вырезаем из наружной окружности якоря дуги, которые будем обозначать через  $b_p$  и называть *полюсными дугами якоря*. Отношение

$$\alpha_p = \frac{b_p}{\tau} \quad (141)$$

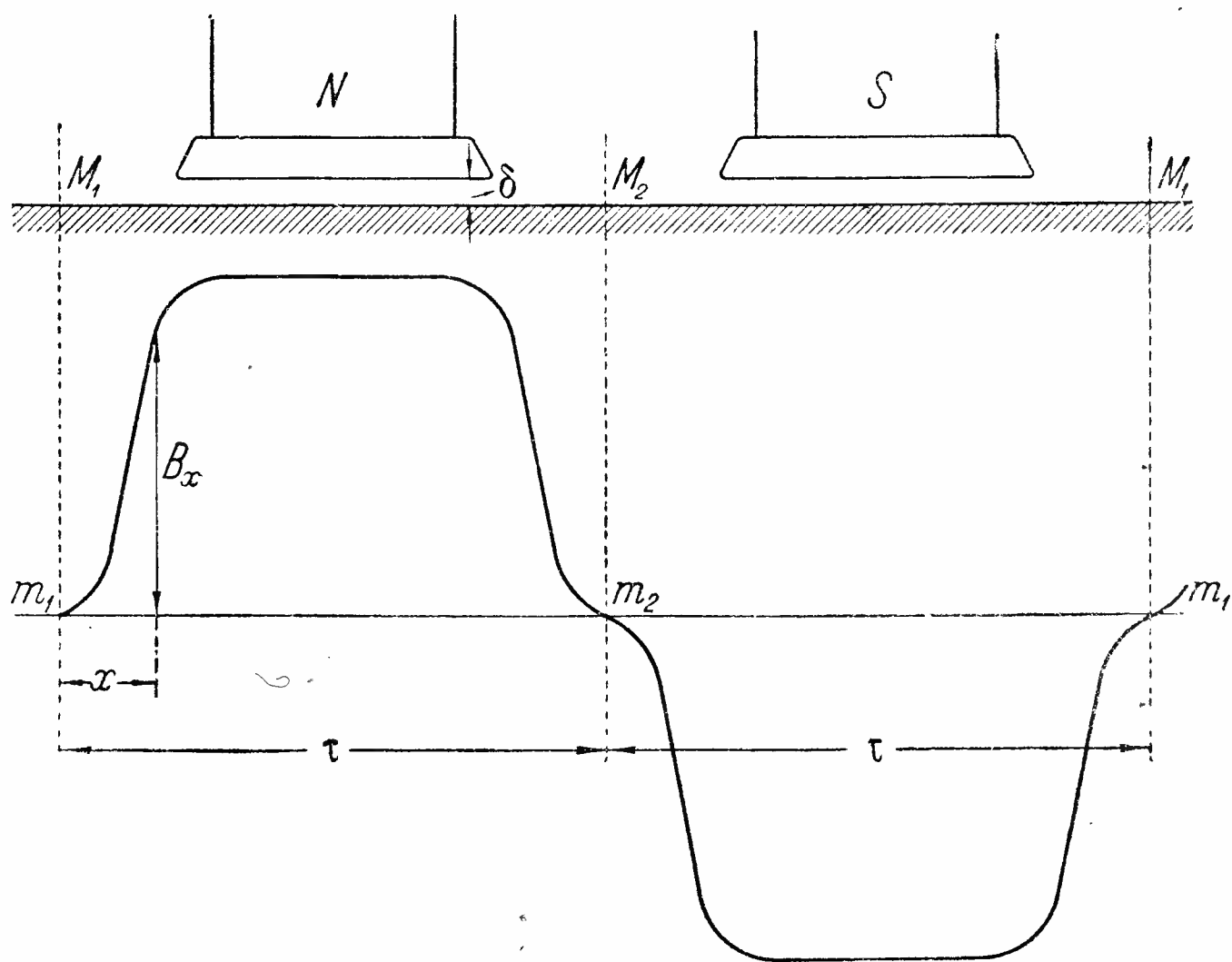
называется *коэффициентом полюсной дуги*.

Предполагая, что полюсы и их башмаки симметричны относительно средней линии полюсов, называемой *осью полюсов*, можем сказать, что по

<sup>1</sup> Под магнитной системой понимается совокупность из магнитных полюсов машины и ярма.



полюсному делению якоря индукция в зазоре будет распределяться симметрично относительно оси полюсов, примерно так, как показано на фиг. 98, где якорь представлен развернутым в плоскость. При этом индукцию в каждой точке якоря под северным полюсом условимся откладывать вверх от оси абсцисс, а под южным полюсом — вниз от оси абсцисс. В точках наружной окружности якоря, расположенных по линии, перпендикулярной к оси полюсов, и называемой геометрической магнитной нейтралью машины, индукция — при холостом ходе машины и при принятом предположении о полной симметрии магнитной системы — будет равна нулю.



Фиг. 98. Кривая индукции спиральной обмотки при  $n = \text{const}$ .

В дальнейшем, при изучении явлений в машине постоянного тока при ее нагрузке, убедимся в том, что точки, в которых магнитная индукция в зазоре на окружности якоря равна нулю, сдвигаются с геометрической магнитной нейтралью.

Линия, соединяющая точки, в которых магнитная индукция действительно имеет нулевое значение, называется физической магнитной нейтралью машины. В нашем случае, при холостом ходе машины, физическая магнитная нейтраль машины совпадает с ее геометрической магнитной нейтралью.

Намагничивающие, или полюсные, катушки предполагаем совершенно тождественными (с одинаковыми числами витков), соединенными последовательно и питаемыми постоянным током неизменной величины. Очевидно, что при этом предположении кривая магнитной индукции в зазоре под южным полюсом будет представлять собой зеркальное изображение относительно оси абсцисс кривой распределения в зазоре магнитной индукции под северным полюсом, сдвинутое на полюсное деление  $\tau$ .

Вращение машины будем принимать равномерным по часовой стрелке со скоростью  $n$  оборотов в минуту, или  $\frac{n}{60}$  оборотов в секунду.

Окружная скорость  $v_a$  любой точки окружности якоря напишется так:

$$v_a = \frac{\pi D_a n}{60} . \quad (142)$$

Так как в двухполюсной машине (140)  $\pi D_a = 2\tau$ ,  
то

$$v_a = 2\tau \frac{n}{60}. \quad (142a)$$

Длину активного проводника обмотки якоря обозначим через  $l$ , индукцию в любой точке  $x$  в зазоре обозначим через  $B_x$ ; тогда для э. д. с.  $e_x$  в любой момент времени в любом активном проводнике обмотки якоря с номером  $x$  можем написать по закону Фарадея:

$$e_x = B_x l v_a. \quad (143)$$

При этом мы приняли во внимание, что линии магнитного потока входят в якорь под прямым углом (§ 46) и что проводник сечет их также под прямым углом

Если индукцию выражать в вольт-секундах на кв. метр, длину в метрах, а  $v_a$  — в метрах в секунду, то по формуле (143) получим  $e_x$  в вольтах. Если же (как принято на заводах) индукцию выражать в гауссах,  $l$  — в см,  $v_a$  — в см/сек, то для получения  $e_x$  в вольтах придется правую часть (143) помножить на  $10^{-8}$

$$e_x = B_x l v_a 10^{-8} \text{ в} \quad (143a)$$

Для определения направления э. д. с.  $e_x$  можно воспользоваться одним из существующих для этой цели мнемонических правил. Наиболее удобным в применении к машинам постоянного тока при правом вращении якоря является следующее мнемоническое правило:

*При правом вращении проводника э. д. с., индуцируемая в нем, имеет по северному магнитному полюсу направление от нас.*

На круглом проводнике, изображенном в разрезе кружком, это отмечается к р е с т и к о м. Из правила следует, что под южным магнитным полюсом и при том же правом вращении проводника получим э. д. с., направленную к нам, что на разрезе круглого проводника отмечается т о ч к о й.

Предполагая, что якорь насажен на вал при помощи втулки из немагнитного материала (например бронзы), будем считать, что магнитный поток, войдя в якорь из северного магнитного полюса машины, раздваивается, проходит по кольцу якоря и входит в южный магнитный полюс. Иначе говоря, предполагаем, что через внутреннюю полость кольцевого якоря не проходит никаких магнитных линий, а следовательно, внутренние проводники обмотки якоря не секут никаких магнитных линий, т. е. в них не индуцируется никаких э. д. с.; по этой причине мы их и называли выше м е р т в ы м и п р о в о д н и к а м и, — мертвыми с точки зрения участия в создании э. д. с. обмотки якоря.

Якорь делается обычно несколько длиннее в осевом направлении, чем полюсные сердечники и их башмаки. Вследствие этого можно принять, что в лобовых частях обмотки якоря также не индуцируется никаких э. д. с. Таким образом, э. д. с. индуцируется только в наружных проводниках обмотки якоря, названных нами поэтому выше а к т и в н ы м и п р о в о д н и к а м и обмотки якоря. Вследствие отмеченных обстоятельств э. д. с. активного проводника является и э. д. с. одновитковой секции обмотки, и ее мгновенное значение выражается формулой (143).

При равномерном вращении якоря ( $v_a = \text{const}$ ) э. д. с.  $e_x$  активного проводника его обмотки будет, очевидно, изменяться во времени по такой же кривой, по какой изменяется индукция в зазоре вдоль окружности якоря (фиг. 98). Таким образом, кривая на фиг. 98 дает в пересчитанном масштабе и зависимость от времени э. д. с. активного проводника  $e_{xt} = f(t)$ , или, что то же, э. д. с. одновитковой секции рассматриваемой нами простейшей кольцевой замкнутой якорной обмотки при равномерном вращении якоря

Э. д. с. активного проводника имеет, как следует из фиг. 98, переменный, периодический характер, причем каждому полному повороту якоря соответствует один период изменения этой э. д. с. Поэтому число периодов  $f$  в секунду, или частота э. д. с., в одном активном проводнике обмотки якоря двухполюсной машины выразится числом оборотов якоря в секунду:

$$f = \frac{n}{60}. \quad (144)$$

Для того чтобы от равномерно вращающегося вхолостую кольцевого якоря ( $n = \text{const}$ ) двухполюсной коллекторной машины постоянного тока получить э. д. с., постоянную по величине, нужно установить на коллекторе по геометрической магнитной нейтрали две щетки, по одной с каждой стороны коллектора. Ширина каждой щетки должна быть больше ширины изоляционных прокладок между коллекторными пластинами. Роль коллектора состоит, таким образом, в преобразовании периодических, переменных э. д. с. отдельных активных проводников якорной обмотки в постоянную по величине э. д. с. между щетками на коллекторе.

Как увидим дальше (§ 69), э. д. с. на коллекторе имеет в действительности пульсирующий характер, поэтому можно говорить только о практически постоянной по величине э. д. с. коллекторной эл. машины постоянного тока (§ 69). Для того чтобы пульсации э. д. с. на коллекторе были незначительными, необходимо, конечно, выполнение определенных условий; о них будет сказано дальше (§ 88).

Неподвижные щетки, опирающиеся на коллектор, имеют целью создать скользящий эл. контакт для осуществления электрической связи между вращающейся обмоткой якоря и неподвижной эл. сетью, к которой присоединяются щетки.

## 68. Несколько вспомогательных понятий

С целью облегчения дальнейшего изложения введем несколько вспомогательных понятий.

1) **Якорное деление** — расстояние по наружной цилиндрической поверхности якоря между образующими цилиндра, по которым расположены два смежных активных проводника якорной обмотки.

Обозначая якорное деление при равномерном расположении проводников по якорю через  $\tau_a$ , получим:

$$\tau_a = \frac{\pi D_a}{s}. \quad (145)$$

2) **Коллекторное деление** — расстояние по наружной поверхности коллектора между серединами коллекторных пластин.

Обозначая диаметр внешней окружности коллектора через  $D_k$ , а коллекторное деление через  $\tau_k$ , имеем:

$$\tau_k = \frac{\pi D_k}{K}. \quad (146)$$

Для  $\tau_k$  можем написать:

$$\tau_k = \beta_k + \delta_i, \quad (147)$$

где  $\beta_k$  и  $\delta_i$  — ширина коллекторной пластины и ширина изоляционной прокладки между двумя смежными коллекторными пластинами, измеренные по внешней окружности коллектора.

3) **Якорный шаг обмотки** (или шаг обмотки по якорю) — дуга, описываемая по наружной окружности якоря при переходе по обмотке якоря от начала (переднего торца) одного активного проводника обмотки до начала следующего активного проводника обмотки.

Якорный шаг обмотки обозначается через  $y_s$  (шаг по секциям), измеряется числом содержащихся в нем якорных делений и считается положительным, если совершается по часовой стрелке.

4) Коллекторный шаг обмотки (или шаг обмотки по коллектору) — дуга, описываемая по наружной поверхности коллектора при переходе по коллектору от какой-либо коллекторной пластины, соединенной с началом секции, до пластины, соединенной с ее концом.

Коллекторный шаг обмотки обозначается через  $y_k$ , измеряется числом содержащихся в нем коллекторных делений и считается положительным, если совершается по часовой стрелке.

В рассмотренной нами (фиг. 96) простейшей спиральной обмотке

$$y_k = y_s = +1. \quad (148)$$

5) Схема кольцевой якорной обмотки — схематическое графическое изображение соединений активных проводников кольцевой обмотки друг с другом и с коллектором.

6) Торцевая схема кольцевой якорной обмотки — схема кольцевой якорной обмотки, изображенная на переднем торце (поперечном виде) машины.

### 69. Э. д. с., индуцируемая в простой спиральной обмотке кольцевого якоря

Предположим, что на фиг. 99 обмотка разрезана в точках  $m_1$  и  $m_2$  и рассмотрим, как будет изменяться во времени э. д. с. между передними торцами проводников № 1 и № 8', предполагая их присоединенными к контактным кольцам  $S_1$  и  $S_2$ , насаженным на вал и изолированным друг от друга и от вала. Предположим, что на кольца опираются две щетки  $b_1$  и  $b_2$ , неподвижные в пространстве (фиг. 99). Кольца  $S_1$  и  $S_2$  имеют одинаковые диаметры, что естественно, но на фиг. 99 они изображены разных диаметров, так как иначе они покрывали бы друг друга. Изображенную на фиг. 99 обмотку будем называть спиральной полуобмоткой.

Очевидно, что, при равномерном вращении якоря со скоростью  $n$  оборотов в минуту, э. д. с. между щетками  $b_1$  и  $b_2$  будет равна в каждый данный момент времени сумме э. д. с., индуцируемых во всех восьми проводниках спиральной полуобмотки, изображенной на фиг. 99.

Развернув якорь в плоскость (фиг. 100) после разреза его по образующей цилиндра, проведенной через левую нейтральную точку  $m_1$ , и изобразив над обмоткой кривую магнитной индукции в зазоре (воспроизводим кривую фиг. 98), проводим над каждым из проводников полуобмотки ординату и измеряем ее в масштабе индукций.

Обозначая в общем случае число активных проводников полуобмотки через  $q$ , можем написать для э. д. с. активных проводников обмотки следующие выражения, используя (143):

$$\begin{aligned} e_{1t} &= B_{1t} lv_a; \\ e_{2t} &= B_{2t} lv_a; \\ &\vdots \\ e_{qt} &= B_{qt} lv_a; \\ \sum_{x=1}^{x=q} e_{xt} &= (B_{1t} + B_{2t} + \dots + B_{qt}) lv_a. \end{aligned} \quad (149)$$

Разделив сумму в скобках на  $q$ , получим среднее значение индукции ( $\bar{B}_q$ ) для  $q$  проводников в момент времени, представленный на фиг. 100:

$$(\bar{B}_q) = \frac{B_{1t} + B_{2t} + \dots + B_{qt}}{q}. \quad (150)$$



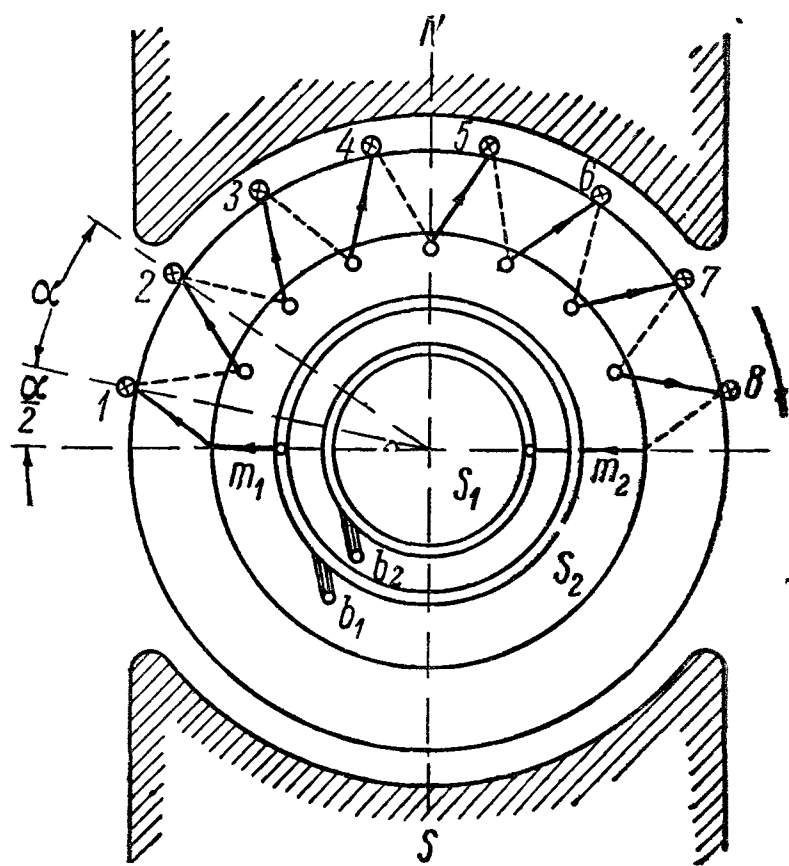
Отсюда имеем:

$$B_{1t} + B_{2t} + \dots + B_{qt} = (\bar{B}_q) q,$$

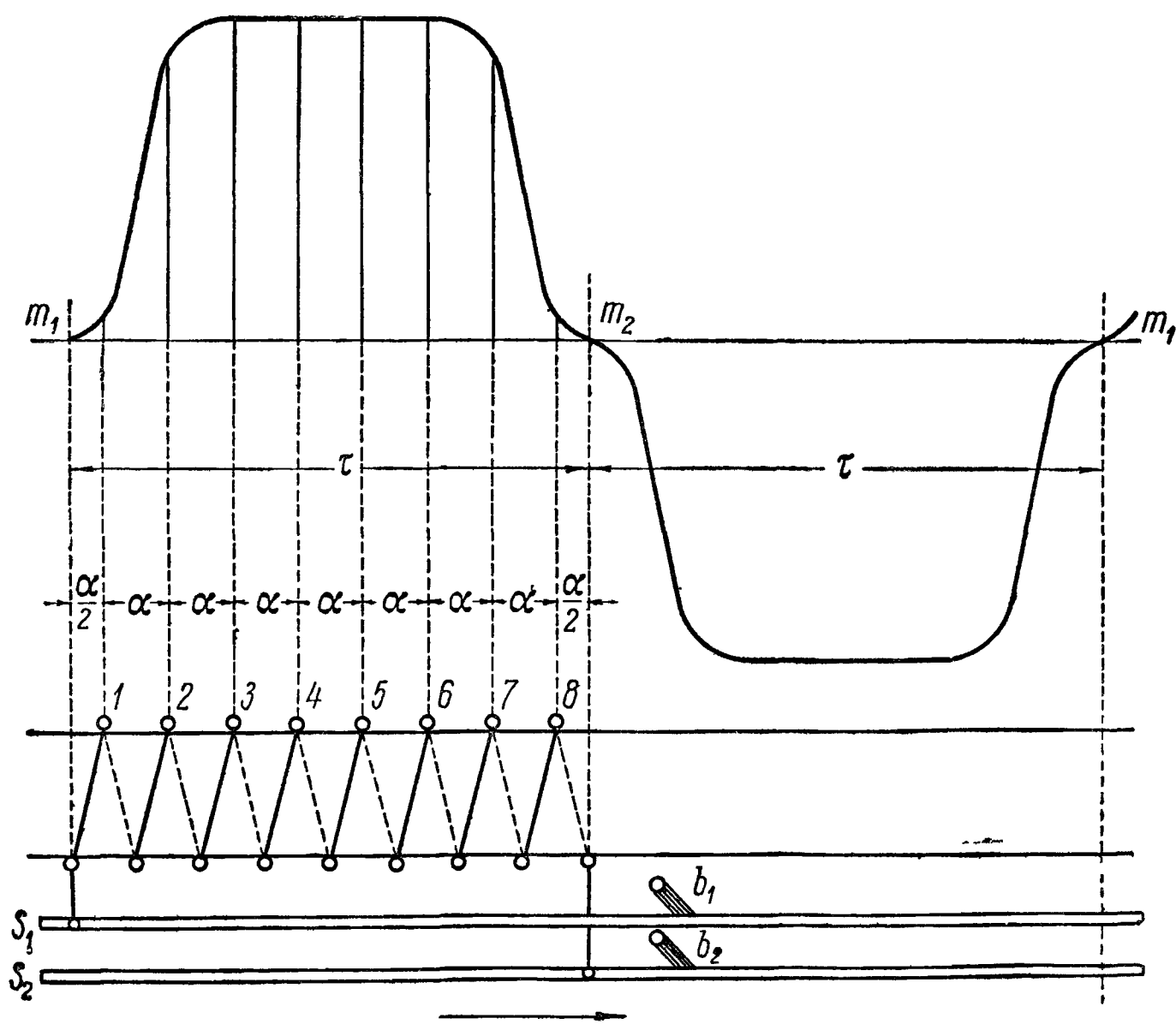
а поэтому мгновенное Э. д. с. между щетками  $b_1$  и  $b_2$  напишется так:

$$\mathcal{E}_t = \sum_{x=1}^{x=q} e_{xt} = (\bar{B}_q) q l v_a. \quad (151)$$

Поскольку  $q$  проводников полуобмотки расположены на фиг. 99 равномерно и симметрично относительно оси кривой поля того полюса, под которым они лежат, то (151) даст максимальное возможное значение Э. д. с. полуобмотки  $\mathcal{E}_t = E_{t \max}$ . При повороте якоря из положения, показанного на фиг. 99, на  $90^\circ$  и четном значении  $q$  половина проводников будет лежать под северным полюсом, а другая половина под южным полюсом, причем каждому проводнику, лежащему под северным полюсом, будет соответствовать один проводник под южным полюсом, лежащий в тождественных магнитных условиях. В результате сумма индукций для  $q/2$  проводников, лежащих под



Фиг. 99. Спиральная полуобмотка.



Фиг. 100. Развертка спиральной полуобмотки (фиг. 99) в плоскость

северным полюсом, будет равна сумме индукций другой половины проводников, лежащих под южным полюсом и обратно ей направлена; поэтому  $(\bar{B}_q) = 0$ , и для этого момента времени Э. д. с.  $\mathcal{E}_t = 0$ . При нечетном  $q$  результат не изменится, так как средний проводник полуобмотки окажется в точке, где магнитная индукция  $B_x$  равна нулю.

При повороте якоря дополнительно на  $90^\circ$  получим картину, аналогичную рассмотренной на фиг. 99, но теперь Э. д. с.  $\mathcal{E}_t$  имеет обратное направление, так как все  $q$  проводников оказываются под южным полюсом. При повороте

якоря еще на  $90^\circ$  получим  $\mathfrak{E}_t = 0$ , а при повороте дополнительно на  $90^\circ$ , т. е. на  $360^\circ$  от начального положения, вернемся к положению, представленному на фиг. 100.

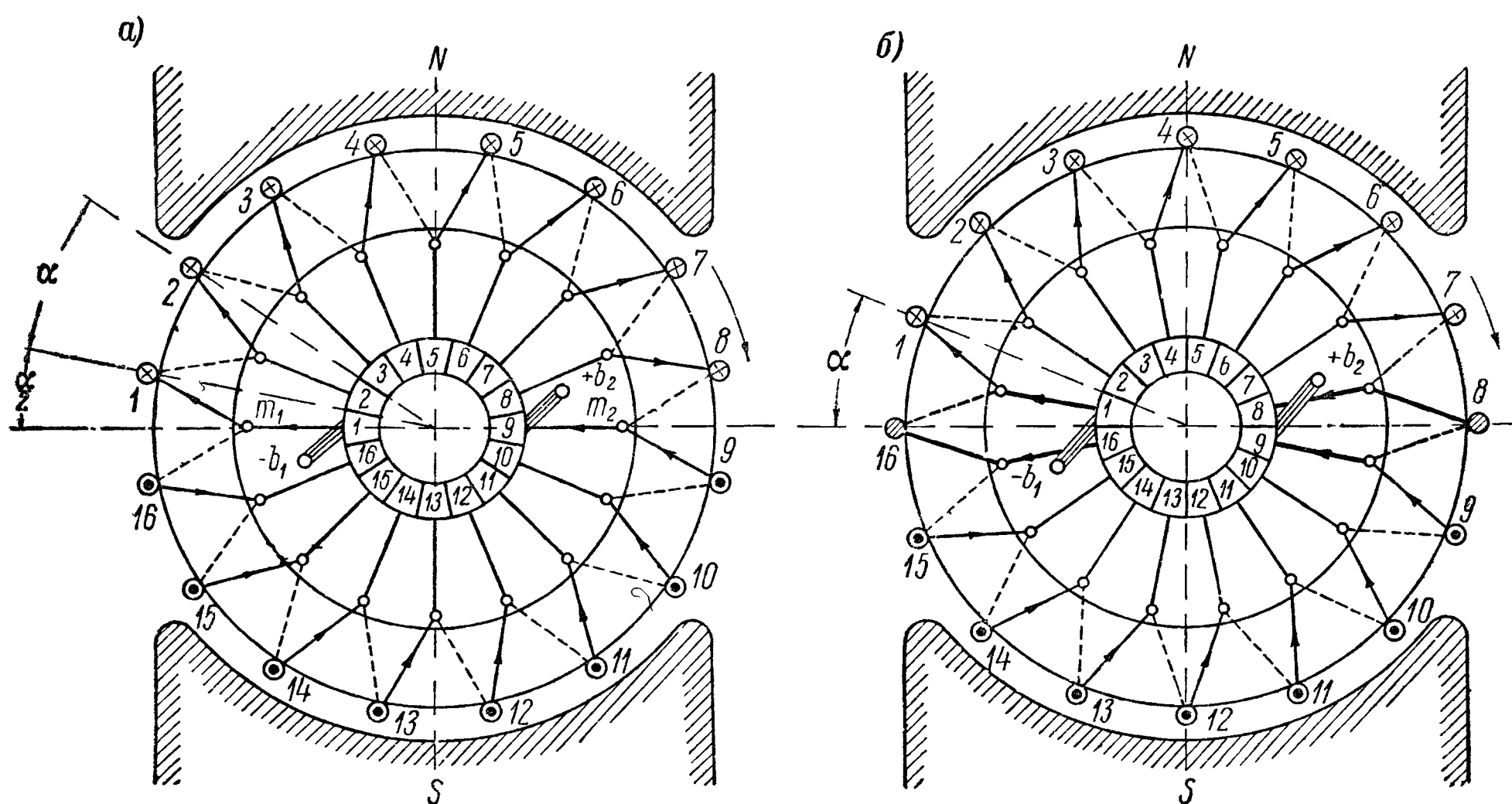
Таким образом, э. д. с.  $\mathfrak{E}_t$  будет иметь периодический характер, переходя два раза за один оборот якоря через значение  $\mathfrak{E}_t = 0$  и два раза через значение  $\mathfrak{E}_t = \mathfrak{E}_{t \max}$ ; следовательно, частота э. д. с.  $\mathfrak{E}_t$  будет такая же, как и частота э. д. с.  $e_t$  в одном активном проводнике (144).

При достаточно большом  $q$  значение  $(\bar{B}_q)$  будет близко к среднему значению ординаты кривой на фиг. 98 за полупериод:

$$B_{\text{med}} = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau B_t dx, \quad (152)$$

т. е. можем написать

$$(\bar{B}_q) \approx B_{\text{med}}. \quad (153)$$



Фиг. 101. Спиральная обмотка в двух положениях относительно щеток.

Тогда (151) переписывается так:

$$\mathfrak{E}_t = \mathfrak{E}_{t \max} = B_{\text{med}} q l v_a = (B_{\text{med}} l v_a) q. \quad (154)$$

Здесь произведение  $B_{\text{med}} l v_a$  есть, очевидно, не что иное, как среднее значение э. д. с.  $e_t$  в одном активном проводнике, или в одной секции, за полупериод.

$$e_{\text{med}} = B_{\text{med}} l v_a, \quad (155)$$

а потому для фиг. 100 можем написать

$$\mathfrak{E}_{t \max} \approx e_{\text{med}} q. \quad (156)$$

Словами это читается так: в положении, показанном на фиг. 100, э. д. с. между щетками  $b_1$  и  $b_2$  на контактных кольцах  $S_1$  и  $S_2$  приближенно равна среднему значению э. д. с. в одном активном проводнике за полупериод, умноженному на число активных проводников в спиральной полуобмотке или, что то же, среднему значению э. д. с. в одной одновитковой секции спиральной полуобмотки за полупериод, умноженному на число последовательно соединенных одновитковых секций полуобмотки.

Вернемся теперь к фиг. 97 с якорем, обмотанным спиральной обмоткой. В момент времени, представленный на фиг. 101, *a* (аналогичен фиг. 97), э. д. с. в каждой половине обмотки, как в верхней, лежащей под северным полюсом, так и в нижней, лежащей под южным полюсом, будут порознь равны значению, даваемому (156), но будут направлены друг другу навстречу; вследствие этого во всей спиральной обмотке, получаемой соединением двух полуобмоток, никакого тока не будет. По отношению к щеткам  $b_1$  и  $b_2$  обмотка будет распадаться на две параллельных ветви, и между щетками  $b_1$  и  $b_2$  на коллекторе получим э. д. с.  $E'$ , вычисляемую по (156)

$$E' = \mathfrak{E}_{t \max} = e_{\text{med}} \cdot q \quad (157)$$

При повороте якоря на угол  $\frac{\alpha}{2}$  получим фиг. 101, *б*. Теперь каждая из щеток на коллекторе замыкает накоротко по одной секции, выключая ее таким образом из цепи обмотки. По отношению к щеткам  $b_1$  и  $b_2$  обмотка (за вычетом короткозамкнутых секций) распадается попрежнему на две параллельных ветви с числом  $q - 1$  проводников в каждой ветви, причем каждому проводнику в параллельной ветви, лежащей под северным полюсом, соответствует один проводник, лежащий в таких же магнитных условиях под южным полюсом и входящий в другую параллельную ветвь обмотки. Сумма э. д. с. активных проводников (одновитковых секций) одной параллельной ветви будет равна сумме э. д. с. активных проводников (одновитковых секций) другой параллельной ветви и обратно ей направлена. Внутри всей якорной обмотки суммарная э. д. с. будет равна нулю, как и на фиг. 101, *a*, но между щетками на коллекторе мы получим э. д. с.  $E''$ , несколько меньшую, чем в случае фиг. 101, *a* (это мы докажем в дальнейшем), но приближенно мы можем вычислять ее по (157)

В положениях якоря, промежуточных между показаниями на фиг. 101, *a* и 101, *б*, э. д. с. якорной обмотки  $E$  будет переходить от значения  $E'$  (фиг. 101, *a*) к значению  $E''$  (фиг. 101, *б*), поэтому приближенно ее можно считать равной э. д. с., вычисляемой по (157):

$$E \approx E' = e_{\text{med}} \cdot q. \quad (158)$$

Число активных проводников рассматриваемой простейшей спиральной обмотки кольцевого якоря ( $s = 2q$ ) равно, очевидно, числу коллекторных пластин машины. Можно показать (об этом дальше), что колебание э. д. с.  $E$  на коллекторе, иначе говоря, пульсация  $E$  будет тем меньше по сравнению со средним значением э. д. с.

$$E_{\text{med}} = \frac{1}{2} (E' + E''),$$

чем больше  $K$ , но частота пульсации э. д. с.  $E$  на коллекторе будет возрастать с увеличением  $K$ .

Таким образом, э. д. с.  $E$  коллекторной эл. машины постоянного тока имеет пульсирующий характер; выбирая надлежащее число  $s = K$ , мы получаем практически постоянную э. д. с., так как с точки зрения промышленного применения машин постоянного тока указанными пульсациями э. д. с. машины постоянного тока вполне можно пренебречь. Однако с точки зрения влияния на расположенные вблизи установки электросвязи как проводочной, так и беспроводной (радиосвязи) указанные пульсации могут создавать недопустимые помехи; для уменьшения их приходится прибегать тогда к соответствующим устройствам (фильтрам).<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Фильтр состоит обычно из конденсаторов, параллельно присоединенных к зажимам якоря.

Как мы видели, при снабжении кольцевого якоря двухполюсной машины спиральной обмоткой, соединенной с коллектором, нужно для получения практически постоянной э. д. с. поставить на коллекторе столько щеток, сколько у машины магнитных полюсов (т. е. две щетки), причем по отношению к щеткам обмотка распадается на две параллельные ветви, т. е. на столько, сколько у машины полюсов

Эту обмотку мы будем называть в дальнейшем простой параллельной обмоткой кольцевого якоря двухполюсной машины. Термин «простой» введен для отличия от обмоток, рассматриваемых в дальнейшем и называемых множественными параллельными обмотками.

## 70. Разновидности простой параллельной обмотки кольцевого якоря; полярности щеток

а) Правая и левая простые параллельные обмотки кольцевого якоря; полярности щеток. Простую параллельную обмотку кольцевого якоря, показанную на фиг. 101, будем называть правой простой параллельной обмоткой кольцевого якоря, потому что, совершая обход ее по схеме обмотки, мы все время передвигаемся вправо.

Имея то же число активных проводников обмотки, что и на фиг. 101, а, но располагая мертвые проводники влево от активных проводников с теми же номерами (фиг. 102) и образуя обмотку с отрицательными шагами  $y_s$  и  $y_k$ :

$$y_k = y_s = -1,$$

получим левую простую параллельную обмотку кольцевого якоря, так как, идя по схеме такой обмотки, мы все время сдвигаемся влево.<sup>1</sup>

Отметим, что в правой простой параллельной обмотке (фиг. 101) правая коллекторная щетка получается положительной (+), а левая — отрицательной (—)

Этот результат можно формулировать в виде следующего мнемонического правила:

*при правом вращении правой простой параллельной обмотки кольцевого якоря в падающем потоке (т. е. в потоке, направленном сверху вниз) правая щетка получается положительной.*

В левой простой параллельной обмотке кольцевого якоря (фиг. 102), при тех же прочих условиях, полярности коллекторных щеток получаются обратными полярностям щеток у правой простой параллельной обмотки кольцевого якоря (фиг. 101), а именно: у левой простой параллельной обмотки при правом вращении правая щетка будет отрицательной.

б) Простая параллельная обмотка кольцевого якоря с нечетным числом секций на пару полюсов. На фиг. 97, 102 и 103 мы брали  $s$  четным, но это не обязательно и, как увидим дальше, часто умышленно не выполняется. На фиг. 103 дана двухполюсная машина с кольцевым якорем, в котором число активных проводников якорной обмотки нечетное:  $s = 15$

В момент времени, представленный на фиг. 103, а, под серединой щетки  $b_1$  находится середина коллекторной пластины № 1; тогда вследствие того, что  $s$  — число нечетное, под серединой щетки  $b_2$  должна находиться

<sup>1</sup> Отметим, что в большинстве книг по машинам постоянного тока названия «правая» и «левая» спиральная обмотка связывают с другим признаком, не имеющим ничего общего со способом образования спиральной обмотки, а именно по аналогии с винтом с правой и с винтом с левой нарезкой. Вследствие этого получают названия «правая» и «левая» спиральная обмотки, обратные нашим, что безусловно нерационально.



изоляционная прослойка между двумя смежными коллекторными пластинами.

В нашем случае, при  $s = K = 15$ , это будет прослойка, разделяющая коллекторные пластины № 8 и № 9, вследствие чего активный проводник № 8 окажется замкнутым накоротко. Прочие активные проводники обмотки ( $15 - 1 = 14$ ) образуют по отношению к коллекторным щеткам две параллельные ветви с равными числами активных проводников ( $\frac{14}{2} = 7$ ), совершенно одинаково расположенных в каждой параллельной ветви. Поэтому электродвижущие силы в каждой ветви будут численно равны, а так как они взаимно-встречно направлены, от внутри якорной обмотки не будет никакого тока.

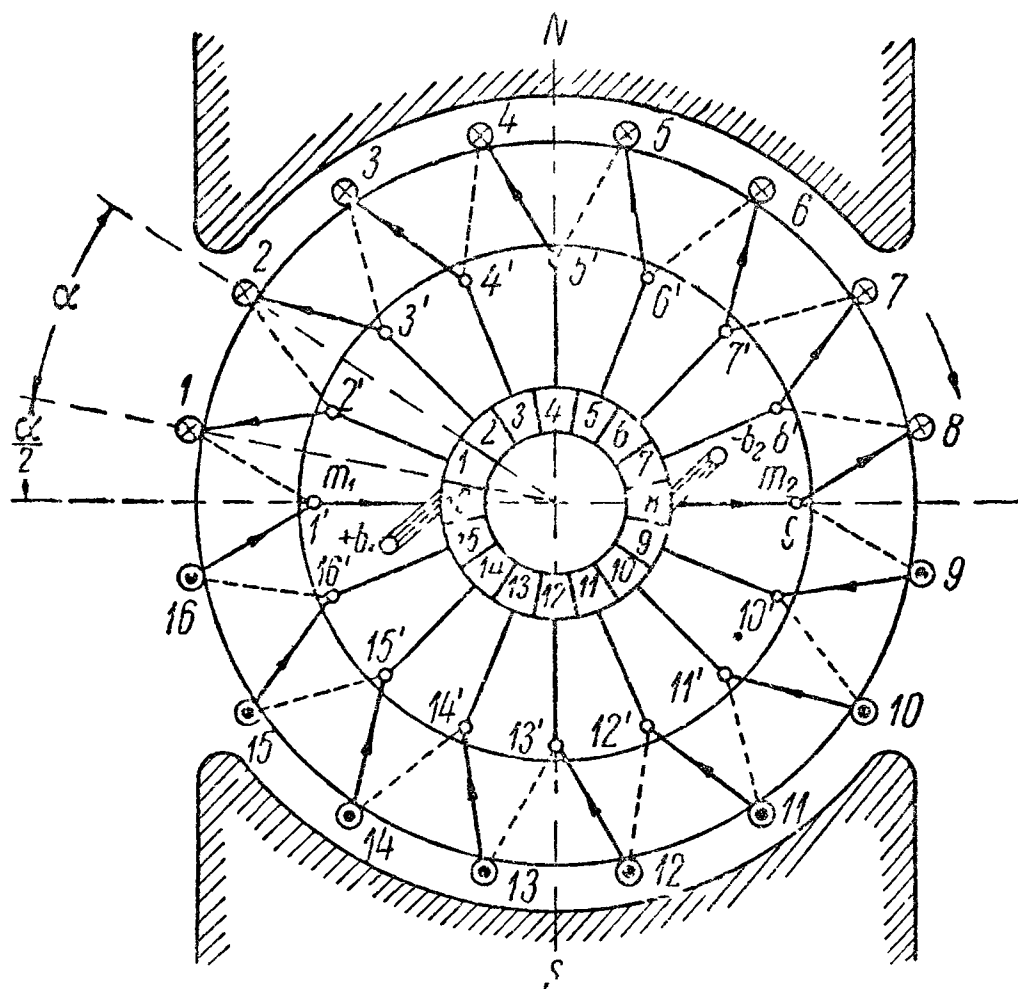
Вполне аналогичную картину получим тогда, когда якорь повернется еще на половину угла  $\alpha$ , соответствующего одному якорному делению, с той только разницей, что теперь будет замкнут накоротко активный проводник № 15 (фиг. 103, б).

В промежуточном положении, когда изоляционная прослойка между коллекторными пластинами № 8 и № 9 выйдет из-под щетки  $b_2$ , а щетка  $b_1$  еще останется целиком на пластине № 1, обмотка якоря будет по отношению к щеткам распадаться на две параллельные ветви, причем в северной параллельной ветви будет попрежнему 7 активных проводников, а в южной параллельной ветви 8 активных проводников.

Очевидно, теперь равенство э. д. с. обеих ветвей, имевшееся в случае фиг. 103, а, нарушится, и внутри обмотки за счет разности э. д. с. обеих ветвей появится ток. То же получим, когда изоляционная прослойка между пластинами № 15 и № 1 выйдет из-под щетки  $b_1$ , а щетка  $b_2$  будет еще находиться целиком на пластине № 8. Теперь в северной параллельной ветви будет 8 активных проводников, а в южной 7 активных проводников, и внутри обмотки якоря появится ток направления обратного, чем в предыдущем случае.

При большом числе секций в обмотке якоря указанными кратковременными незначительными нарушениями равновесия э. д. с. обеих параллельных ветвей можно пренебречь и можно пользоваться для вычисления э. д. с. якоря формулой (158).<sup>1</sup>

в) Простая параллельная обмотка кольцевого якоря с многовитковыми секциями. В обмотках на предыдущих рисунках каждая секция состоит из одного витка (одновитковая секция) и имеет один активный проводник. Однако возможно осуществить простую параллельную обмотку, имеющую секции из нескольких  $w_s$  витков (фиг. 104).



Фиг. 102 Левая параллельная обмотка кольцевого якоря

<sup>1</sup> Необходимо, кроме того, отметить, что при указанном неравенстве числа активных проводников в параллельных ветвях равенство э. д. с. нарушится весьма мало, так как расположение проводников в магнитном поле будет различным. Можно показать, что при синусоидальном распределении индукции в зазоре машины э. д. с. параллельных ветвей всегда будут равны между собой. (Прим. ред.)

Тогда среднее значение э. д. с. в одной такой многовитковой секции будет в  $w_s$  раз больше, чем в одновитковой секции (155):

$$e_{\text{med}} \approx B_{\text{med}} l v_a \cdot w_s, \quad (159)$$

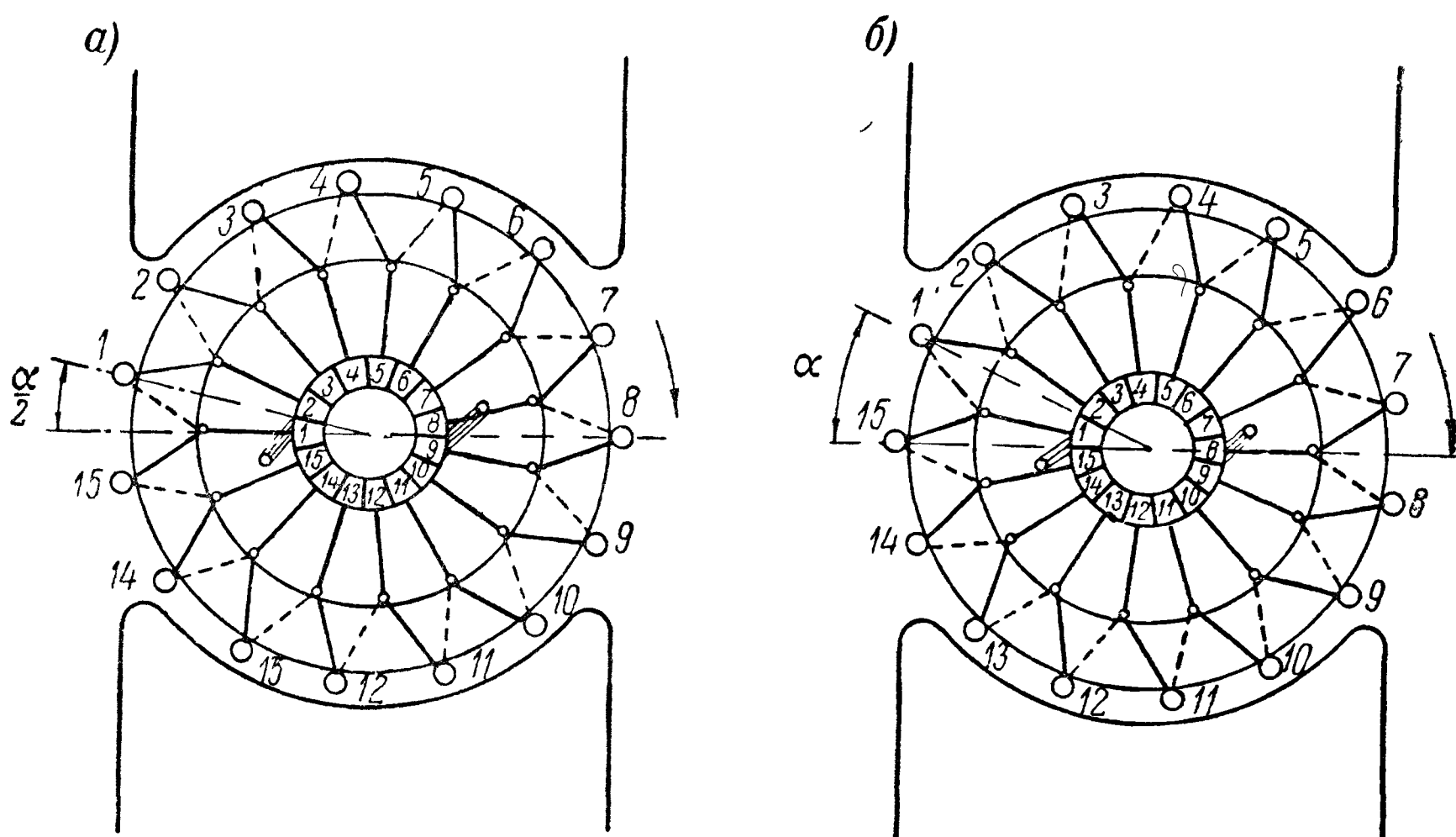
а э. д. с. между коллекторными щетками будет:

$$E = B_{\text{med}} l v_a w_s q = B_{\text{med}} l v_a \frac{w_s s}{2} = B_{\text{med}} l v_a \frac{N}{2}, \quad (160)$$

где

$$q = \frac{s}{2}; \quad N = w_s s. \quad (161)$$

Здесь  $N$  — полное число активных проводников кольцевого якоря.



Фиг 103 Простая параллельная обмотка с нечетным числом проводников на пару полюсов.

С точки зрения осуществления якорной обмотки безразлично, какое число витков в секции, так как независимо от этого числа приходится при образовании замкнутой обмотки оперировать с концами секций, а их всегда два. Поэтому в машине с многовитковыми секциями число их

$$s = \frac{N}{w_s}, \quad (161a)$$

где  $s$  можно назвать приведенным числом активных проводников обмотки; оно определяет число секций обмотки  $s$ , равное числу коллекторных пластин  $K$ :

$$s = K.$$

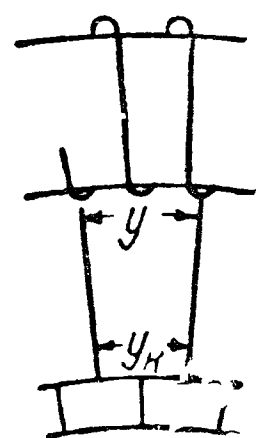
Как увидим в дальнейшем, это соотношение сохранится и для современных обмоток барабанного якоря.

г) Простая параллельная обмотка кольцевого якоря многополюсной эл. машины. На фиг. 97 мы внесли кольцевой якорь с простой параллельной обмоткой в двухполюсную магнитную систему с одним северным и одним южным полюсом.

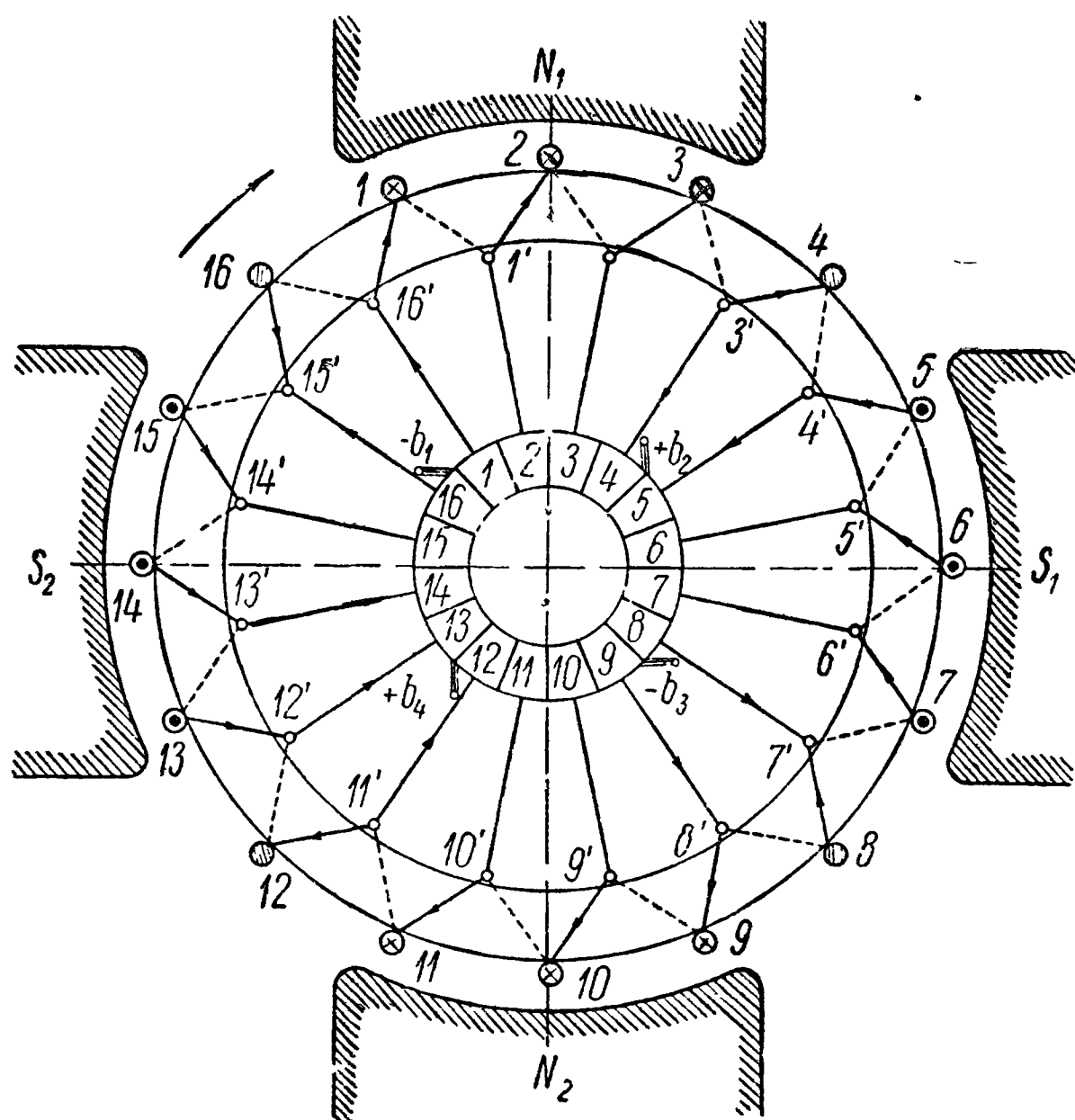
Теперь внесем тот же якорь в четырехполюсную магнитную систему с полюсами двух чередующихся полярностей: северный — южный — северный — южный (фиг. 105). В такой машине будут теперь на окружности

якоря четыре точки, в которых магнитная индукция равна нулю. Они будут располагаться между каждыми двумя смежными полюсами. Кривая получающегося распределения магнитной индукции вдоль наружной окружности якоря представлена для этого случая на фиг. 106. Та же кривая даст в пересчитанном масштабе изменение во времени э. д. с. в каждом активном проводнике обмотки при его равномерном вращении вместе с якорем. Как видно, теперь за один оборот якоря э. д. с. каждого проводника будет изменяться во времени с частотой, в два раза превышающей скорость вращения якоря, выраженной в оборотах в секунду. При магнитной системе из чередующихся трех северных и трех южных магнитных полюсов частота э. д. с. в одном проводнике будет в три раза больше скорости вращения якоря в оборотах в секунду и т. д.

При чередующихся полярностях магнитных полюсов полное число полюсов машины будет всегда четным, — число северных полюсов всегда равно числу южных полюсов; поэтому полное число магнитных полюсов машины будем обозначать через  $2p$ , где  $p$  — число пар полюсов.



Фиг. 104.  
Секция  
многовитко-  
вой спираль-  
ной обмотки  
 $w_s = 2$ .



Фиг. 105. Простая параллельная обмотка многополюсной машины.

Обобщая указание относительно частоты э. д. с. в активном проводнике в четырехполюсной и в шестиполюсной машинах на машины с любым числом магнитных полюсов  $2p$ , можем сказать, что частота этой э. д. с. напишется так:

$$f = \frac{n}{60} p = \frac{pn}{60}. \quad (162)$$

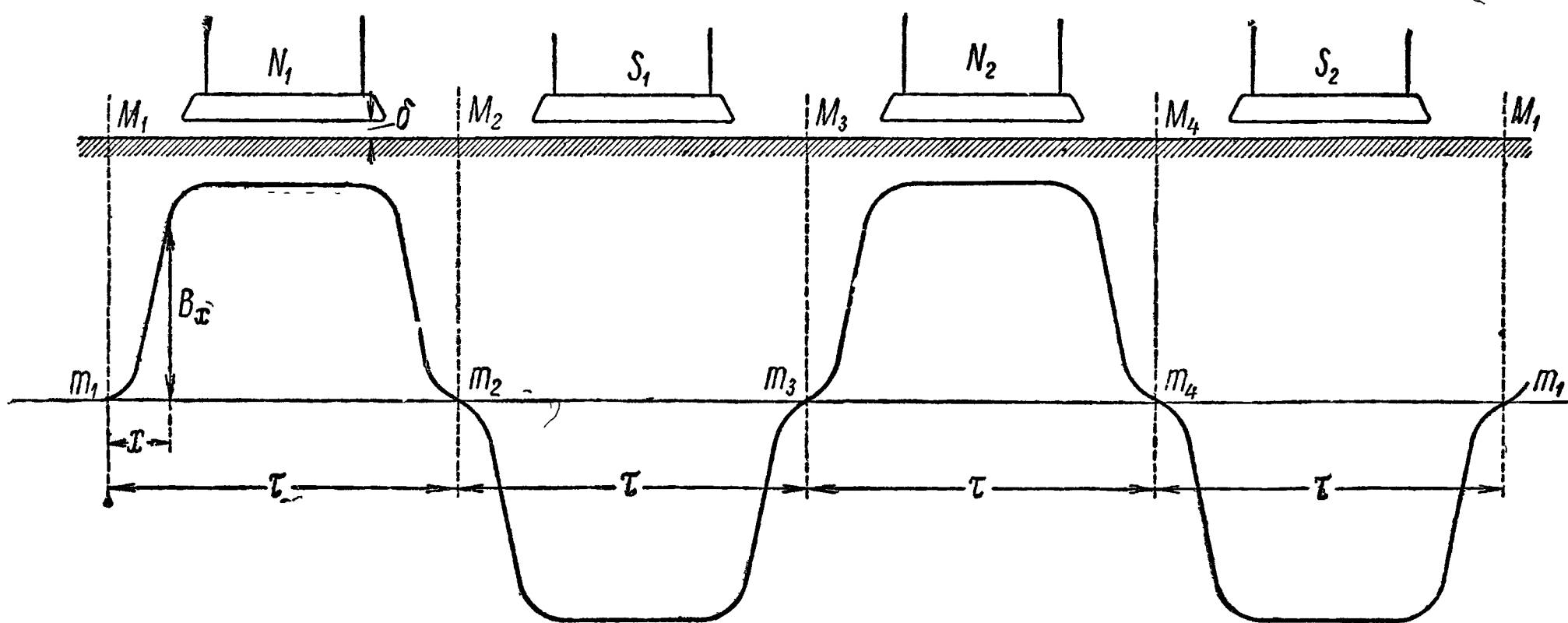
Это соотношение, связывающее частоту  $f$ , изменения э. д. с., индуцированной в обмотке якоря, скорость вращения  $n$  и число пар полюсов машины  $p$  является основным в теории машин переменного тока (синхронных машин). Для машин постоянного тока оно также имеет существенное значение, так как определяет частоту перемагничивания якоря, а следовательно и потери в стали его.

Поэтому для многополюсной машины вместо (142а) получим:

$$v_a = 2\tau \cdot \frac{pn}{60}. \quad (163)$$

Каждый раз при переходе активного проводника через магнитную нейтраль направление э. д. с., индуцируемой в нем, будет изменяться на обратное.

Поставив (фиг. 105) в нейтральных точках щетки  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  и  $b_4$ , нетрудно убедиться в том, что две из них,  $b_2$  и  $b_4$ , будут положительными, а две,  $b_1$  и  $b_3$ , будут отрицательными, причем число и расположение активных проводников между любыми двумя смежными щетками будут одинаковыми. Щетками



Фиг. 106. Кривая магнитного поля многополюсной эл. машины.

обмотка разбивается таким образом на четыре параллельные ветви: две северные и две южные, в которых в каждый данный момент э. д. с. будут одинаковыми по величине. Соединив одноименные щетки,  $b_1$  с  $b_3$  и  $b_2$  с  $b_4$ , получим два внешних зажима якоря машины, один положительный и один отрицательный, между которыми будут включены четыре параллельных ветви обмотки якоря. Э. д. с. якоря будет, очевидно, равняться э. д. с., индуцируемой в каждой из параллельных ветвей обмотки и может быть вычислена по (158).

Из сказанного следует, что в многополюсной машине с простой спиральной обмоткой число параллельных ветвей обмотки всегда четное (равное сумме числа северных и числа южных ветвей) и равно числу полюсов машины. Обозначая число параллельных ветвей обмотки через  $2a$ , можем написать:

$$2a = 2p, \text{ или } a = p. \quad (164)$$

Здесь  $a$  — число пар параллельных ветвей обмотки.

Простая параллельная обмотка многополюсного кольцевого якоря с числом параллельных ветвей, равным числу полюсов, называется простой параллельной обмоткой многополюсного кольцевого якоря. Равенство (164) является ее основным отличительным признаком.

Рассмотренная нами раньше обмотка (фиг. 101) является, очевидно, частным случаем простой параллельной обмотки кольцевого якоря, когда  $a = p = 1$ .

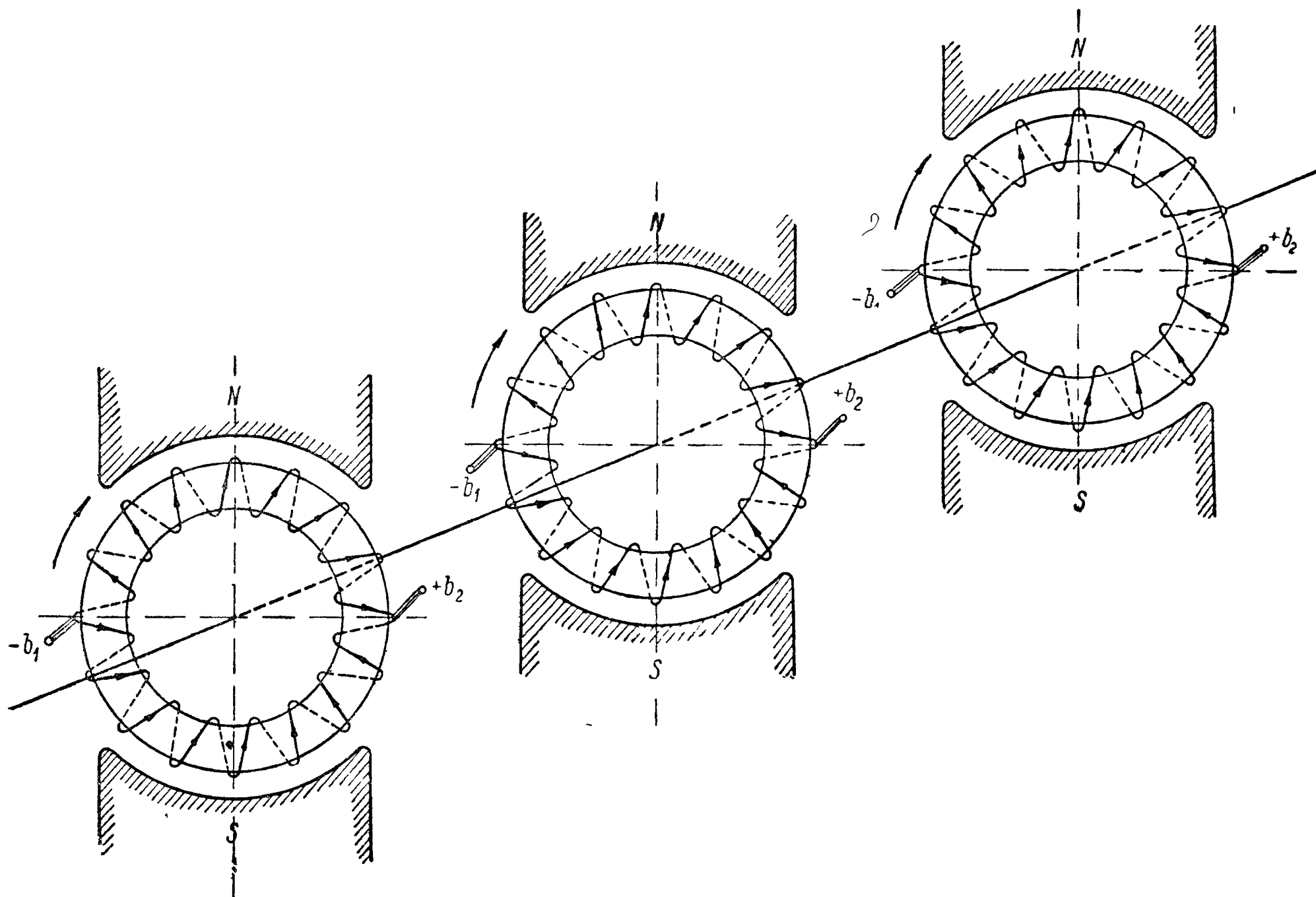
Вычисляя э. д. с. многополюсной эл. машины по (158) и подставляя в нее  $e_{med}$  (155) и  $q$ , нужно помнить, что теперь  $v_a$  следует брать по (163), а вместо  $\frac{s}{2}$  подставлять  $\frac{s}{2a}$ , так как теперь

$$q = \frac{s}{2a}. \quad (165)$$



### 71. Условия симметрии простой параллельной обмотки кольцевого якоря многополюсной машины постоянного тока

Каждые две следующие друг за другом параллельные ветви простой параллельной обмотки кольцевого якоря многополюсной ( $p > 1$ ) машины постоянного тока эквивалентны, как это вытекает из вышесказанного, двухполюсной машине, снабженной простой параллельной якорной обмоткой, вращающейся со скоростью, превышающей в  $p$  раз действительную скорость вращения  $n$  многополюсной машины. Поэтому последнюю мы можем мыслить



Фиг 107 Схема, эквивалентная простой параллельной обмотке многополюсной машины.

как  $p$  насаженных на общий вал и электрически параллельно соединенных двухполюсных машин, которые вращаются со скоростью  $n \cdot p$ . Так, шести-полюсную машину с простой параллельной обмоткой, вращающуюся со скоростью  $n$  оборотов в минуту, можно представить в виде агрегата, показанного на фиг. 107. Для того чтобы при любом положении якорей рассматриваемого агрегата, эквивалентного многополюсной машине, э. д. с., индуцированные в этих якорях, были одинаковы, нужно, чтобы все  $p$  двухполюсных машин, которыми она может быть заменена, были совершенно идентичны и были закли-нены на общем валу так, чтобы соответствующие активные проводники разных якорей были всегда одинаково расположены в магнитном поле. Для идентичности якорей нужно, чтобы число секций или, что то же, число коллекторных пластин  $K_p$  в каждой из двухполюсных машин было одно и то же, т. е. должно выполняться условие:

$$K_p = \frac{K}{p} = \frac{K}{a} = \text{ц. ч.},^1 \quad (166)$$

где  $K$  — полное число коллекторных пластин в многополюсной машине.

Если мы соединим электрически одинаково расположенные в магнитном поле активные проводники  $p$  якорей их задними или их передними торцами

<sup>1</sup> Здесь и дальше через «ц ч.» сокращенно обозначается «целое число».

или соединим соответствующие им коллекторные пластины, то в упомянутом соединении не появится никакого тока, так как это будет соединение в одну группу  $p$  точек одинакового потенциала — **равнопотенциальное** (или эквипотенциальное) **соединение**

Так как в каждой двухполюсной машине имеется по  $K_p$  (166) коллекторных пластин, то всего возможно  $K_p$  таких групп соединений из  $a$  равнопотенциальных точек. В нашем рассуждении мы молчаливо предположили, что потоки всех  $p = a$  двухполюсных машин и кривые распределения индукции в воздушных зазорах совершенно тождественны. Если это окажется нарушенным, то соединенные вместе  $p = a$  точек не будут в действительности равнопотенциальными, и по этим соединениям, называемым уравнительными соединениями, потекут токи, которые (как увидим дальше) будут восстанавливать равенство магнитных потоков.

Причины производственного происхождения, нарушающие равенство потенциалов  $p = a$  точек, теоретически равнопотенциальных, всегда имеются, а потому осуществление уравнительных соединений в простых параллельных обмотках многополюсных машин, как показал опыт электромашиностроения, не только полезно, но и совершенно необходимо для успешной работы простой параллельной обмотки многополюсной машины постоянного тока. При этом устройство всех  $K_p$  возможных групп уравнительных соединений требуется лишь в крупных машинах, в машинах средних мощностей достаточно осуществить лишь некоторую часть возможных  $K_p$  соединений, распределяя их по якорной обмотке, по возможности, равномерно.

Раньше мы видели, что число секций  $K$  для двухполюсной машины может быть как четным, так и нечетным, поэтому нет необходимости в том, чтобы  $K_p$  было числом четным, т. е. нет необходимости в том, чтобы  $\frac{K}{2a} =$  целому числу, а достаточно выполнить равенство (166):  $K_p = \frac{K}{a} =$  целому числу. Простые параллельные обмотки, удовлетворяющие условию (166), Арнольд назвал симметричными. Правильнее их назвать практически симметричными простыми параллельными обмотками. Простые параллельные обмотки, удовлетворяющие условию:

$$\frac{K}{2a} = \text{ц. ч.}, \quad (167)$$

следует называть строго симметричными. Выполнения такой строгой симметрии практически не требуется для успешной работы простой параллельной обмотки.

Примененное на фиг. 107 изображение кольцевого якоря предполагает объединение коллектора с якорной обмоткой, для чего наружные стороны вплотную намотанных активных проводников обмотки якоря должны быть очищены от изоляции.<sup>1</sup>

Шаг уравнительных соединений  $y_p$  называется **уравнительным шагом**; он измеряется числом коллекторных делений:

$$y_p = \frac{K}{p} = \frac{K}{a}. \quad (168)$$

Таким образом, в простой параллельной обмотке многополюсной машины постоянного тока шаг  $y_p$  численно равен числу возможных групп уравнительных соединений:

$$n_p = \frac{K}{a}. \quad (169)$$

<sup>1</sup> Такая конструкция раньше выполнялась для внешнероторных машин постоянного тока.

По причинам, которые будут пояснены в дальнейшем (§ 102), уравнительные соединения, осуществляемые в простой параллельной обмотке кольцевого якоря многополюсной машины, будем называть **у р а в н и т е л ь н ы м и** **с о е д и н е н и я м и** **I ( п е р в о г о ) р о д а**.

## 72. Выполнение простой последовательной обмотки кольцевого якоря

Как мы видели, простая спиральная якорная обмотка кольцевого якоря, являющаяся простой параллельной обмоткой, имеет столько параллельных ветвей, сколько в машине полюсов ( $2a = 2p$ , или  $a = p$ ). Естественным является вопрос: нельзя ли, имея многополюсную машину ( $p > 1$ ), устроить замкнутую якорную обмотку с одной только парой параллельных ветвей ( $a = 1$ )? Ответ получается положительным: такая якорная обмотка возможна и называется **п р о с т о й п о с л е д о в а т е л ь н о й о б м о т к о й**. Это вторая основная замкнутая обмотка кольцевого якоря.

Осуществляя простую последовательную обмотку с  $2a = 2$ , или  $a = 1$ , мы должны, очевидно, составить всего две параллельные ветви; одна из них должна включать в себя все активные проводники, лежащие под всеми северными магнитными полюсами машины, а другая — все активные проводники, лежащие под всеми южными магнитными полюсами. При этом якорная обмотка должна быть замкнутой и, по возможности, не менять своих свойств при вращении якоря.

Возьмем четырехполюсную машину ( $2p = 4$ ) с кольцевым якорем, снабженным 11 проводниками,<sup>1</sup> и дадим им номера, как показано на фиг. 108, а; соединим, кроме того, начала активных проводников с их коллекторными пластинами. Коллектор заклиним на валу машины так, чтобы середина коллекторной пластины № 1, соединенной с проводником № 1, приходилась на геометрической магнитной нейтрали между полюсами  $N_2$  и  $S_2$ .<sup>2</sup> Начиная обход обмотки с проводника № 1, лежащего под северным полюсом  $N_1$ , мы должны (согласно сказанному выше), прежде чем присоединиться к началу смежного проводника, лежащего справа от № 1, т. е. к началу проводника № 2, захватить по одному активному проводнику, лежащему под всеми прочими северными полюсами в таких же, по возможности, магнитных условиях, как проводник № 1. В нашем примере ( $2p = 4$ ) таких северных полюсов только один ( $N_2$ ), причем под ним нет проводника, который лежал бы в таких же магнитных условиях, как проводник № 1 под полюсом  $N_1$ . Присоединяемся к началу проводника № 7, занимающего положение в магнитном поле, несколько сдвинутое по часовой стрелке, т. е. вправо, по сравнению с положением проводника № 1 под полюсом  $N_1$ . Присоединиться к началу проводника № 7 это все равно, что присоединиться к его коллекторной пластине № 7, что и делаем. Таким образом, мы совершаем шаг обмотки:

$$y_s = y_k = +6.$$

Нетрудно убедиться в том, что, соединяя конец секции № 7 с началом секции № 2 или, что то же, с коллекторной пластиной № 2, мы сделаем тот же шаг:  $y_s = y_k = +6$ .

Если бы у нас было в общем случае  $p$  северных полюсов, то, захватив под каждым из них по одному проводнику, мы сделали бы  $y_s \cdot p$  шагов по якорю. Поскольку мы приходим к проводнику № 2, лежащему справа от исходного, то при рассмотренном обходе мы проходим  $s + 1$  якорное деление. Поэтому можем написать:

$$y_s \cdot p = s + 1,$$

<sup>1</sup> Почему взято нечетное число активных проводников, будет пояснено дальше.

<sup>2</sup> Такое заклинение коллектора на валу машины выбираем ради получения при составлении обмотки равных, по возможности, передних соединительных частей обмотки.

откуда

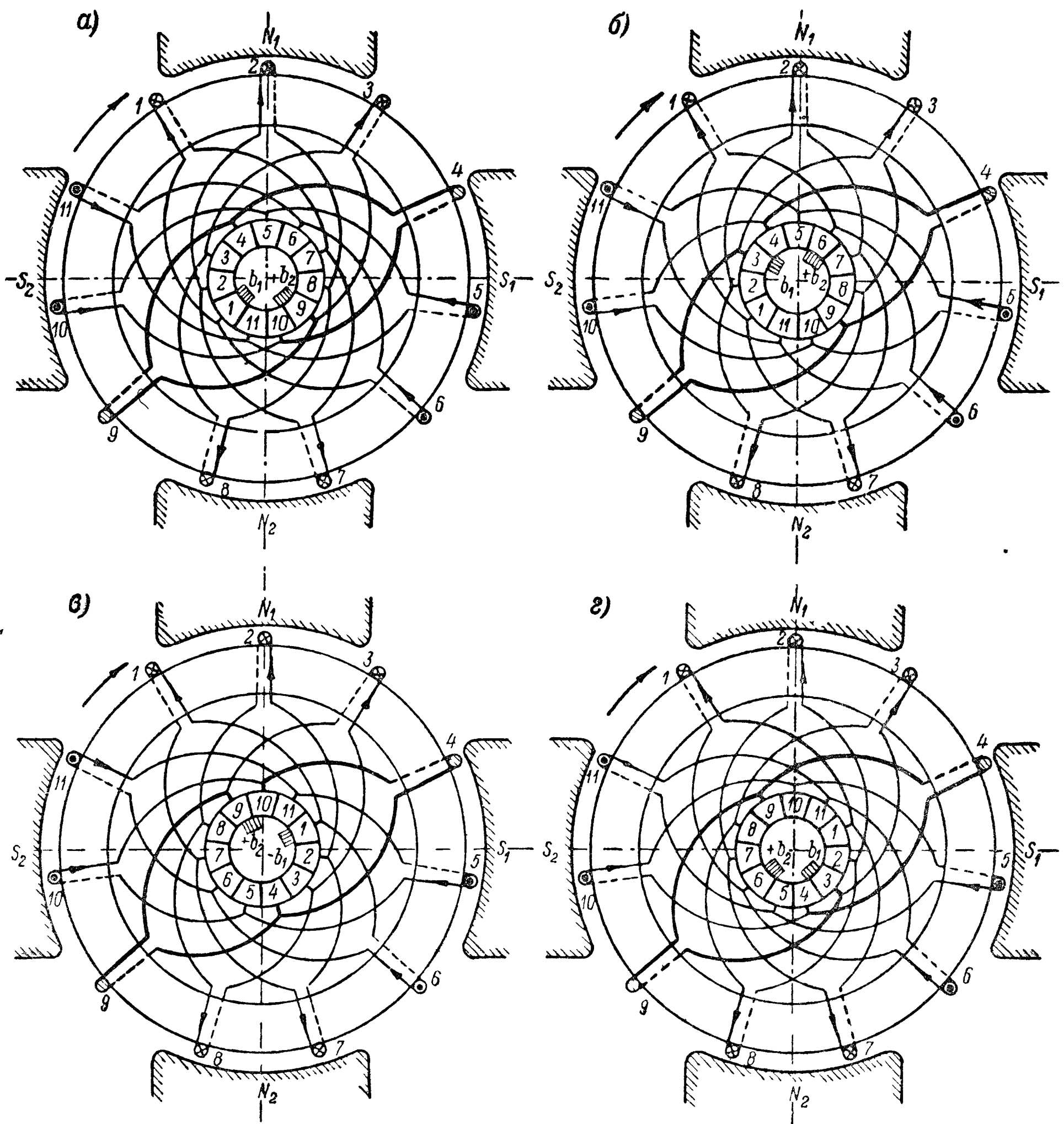
$$y_s = \frac{s+1}{p} . \quad (170)$$

Нетрудно убедиться, что мы в то же время делаем  $y_k \cdot p$  шагов по коллектору и, так как приходим к коллекторной пластине № 2, то всего проходим  $K + 1$  коллекторных делений, следовательно, можем написать.

$$y_k \cdot p = K + 1,$$

откуда

$$y_k = \frac{K+1}{p} \quad (171)$$



Фиг. 108 Разновидности простой последовательной обмотки четырехполюсной машины.

Так как  $K = s$ , то

$$y_k = y_s = \frac{K+1}{p} = \frac{s+1}{p} . \quad (172)$$

Идя дальше с тем же шагом  $y_s = y_k = +6$  и захватив все проводники, лежащие под магнитными полюсами  $N_1$  и  $N_2$ , мы придем к началу проводника № 10, лежащего под полюсом другой полярности ( $S_2$ ). Очевидно, на кол-



лекторной пластине № 10 нужно поставить щетку  $b_2$ , так как мы дальше будем проходить по проводникам, которые должны составить вторую, а именно южную параллельную ветвь обмотки. Ширину щетки  $b_2$  берем равной ширине щетки  $b_1$  и располагаем середину ее на расстоянии полюсного деления по коллектору от середины щетки  $b_1$ . При этом, как видим, щетка  $b_2$  будет соприкасаться с коллекторными пластинами № 9 и № 10.

Двигаясь по обмотке с теми же шагами  $y_s = y_k = +6$ , мы придем к коллекторной пластине № 1, замкнув таким образом якорную обмотку.

Проделанный нами обход обмотки можно зафиксировать следующей таблицей:

$$\begin{array}{llll} 1 + 6 = 7; & & 3 + 6 = 9, & & 5 + 6 = 11, \\ 7 + 6 = 13, & 13 - 11 = 2, & 9 + 6 = 15, & 15 - 11 = 4; & 11 + 6 = 17, & 17 - 11 = 6; \\ 2 + 6 = 8; & & 4 + 6 = 10; & & 6 + 6 = 12, & 12 - 11 = 1 \\ 8 + 6 = 14; & 14 - 11 = 3; & 10 + 6 = 16; & 16 - 11 = 5, & & \end{array}$$

Беря за исходный пункт обхода щетку  $b_1$  и обозначая коллекторные пластины цифрами в скобках, а проводники — цифрами без скобок, получим следующие две параллельные ветви обмотки.

$$- b_1 \left\{ \begin{array}{l} (1) - \overset{\times}{1} - (7) - \overset{\times}{7} - (2) - \overset{\times}{2} - (8) - \overset{\times}{8} - (3) - \overset{\times}{3} - (9) \\ (1) - \overset{\circ}{6} - (6) - \overset{\circ}{11} - (11) - \overset{\circ}{5} - (5) - \overset{\circ}{10} - (10) \end{array} \right\} + b_2$$

Вне этих ветвей оказываются проводники № 4 и № 9, замыкаемые щеткой  $b_2$  накоротко. Северная и южная параллельные ветви содержат неодинаковые числа активных проводников, но при достаточном числе проводников  $s$  на якоре этим неравенством можем пренебречь и для вычисления э. д. с. якоря при его равномерном вращении воспользоваться формулой (158), подставляя в нее  $q = s/2$ .

Теперь можно пояснить, почему мы взяли на фиг. 108 нечетное число активных проводников ( $s = 11$ ). Выражение (170) можно переписать так:

$$y = \frac{s}{p} + \frac{1}{p}.$$

Если бы  $s/p$  было целым числом, то  $y$  получилось бы нецелым числом, а шаг  $y$ , измеряемый числом якорных делений, должен быть числом целым. Так как в нашем примере  $p = 2$  — число четное, то  $s$  должно быть нечетным. То же нужно сказать и о выражении для  $y_k$  (171), которое можно переписать так:

$$y_k = \frac{K}{p} + \frac{1}{p}.$$

Здесь

$$\frac{K}{p} = 2 \frac{K}{2p} \quad (173)$$

есть, очевидно, двойное полюсное деление по коллектору.

Характер изменения э. д. с. в активном проводнике обмотки не зависит от того, как проводники соединены между собой, и каждый раз, когда проводник проходит через геометрическую магнитную нейтраль, направление индуцируемой в нем э. д. с. изменяется на обратное. Так как э. д. с. проводников обмотки якоря, входящих в одну и ту же параллельную ветвь, должны иметь в рационально устроенной обмотке одинаковое направление, то любой проводник должен в течение каждого оборота якоря переходить  $2p$  раз из одной ветви в другую, а именно, при каждом переходе через геометрическую магнитную нейтраль. В параллельных обмотках такое переключение осуществляется щетками, стоящими на всех магнитных нейтралях. В только что составленной простой последовательной обмотке кольцевого якоря имеем всего две щетки, по числу параллельных ветвей обмотки, но необходимое число переключений

активных проводников из одной ветви в другую совершается здесь также необходимое число раз ( $2p$ ). Это происходит благодаря тому, что в момент перекрытия каждой из щеток изоляционной прослойки между двумя смежными коллекторными пластинами замыкается накоротко столько последовательно соединенных друг с другом секций обмотки, проходящих через нейтральные в магнитном отношении точки, сколько в машине одноименных полюсов, т. е. сколько пар полюсов.

### 73. Разновидности простой последовательной обмотки кольцевого якоря

а) Правая и левая простая последовательная обмотка кольцевого якоря. Выше, составляя простую последовательную обмотку, мы делали шаги по коллектору  $y_k$ , которые были несколько больше двойного полюсного деления по коллектору, а именно, на  $\frac{1}{p}$  часть коллекторного деления (173). Сделав  $p$  таких шагов, мы при возврате под исходный полюс попадали на коллекторную пластину с номером, который на единицу больше номера исходной коллекторной пластины. Иначе можно сказать так: при каждом шаге  $y_k$  мы сдвигались в магнитном поле на  $\frac{1}{p}$  часть коллекторного деления вправо, а после  $p$  шагов сдвинулись на  $\frac{1}{p} \cdot p = 1$ , т. е. на одно коллекторное деление вправо. По этой причине рассмотренную обмотку (фиг. 108, а) будем называть **п р а в о й п р о с т о й п о с л е д о в а т е л ь н о й о б м о т к о й**.

Если бы в той же кольцевой машине с  $2p = 4$  и  $s = 11$  мы делали шаги по коллектору, равные

$$y_k = \frac{K}{p} - \frac{1}{p'},$$

т. е. меньшие на  $\frac{1}{p}$ , чем двойное полюсное деление по коллектору, то, сделав  $p$  шагов, мы пришли бы после полного обхода коллектора к пластине с номером, на единицу меньшим, чем номер исходной коллекторной пластины (фиг. 108, б).

$$y_k \cdot p = K - 1,$$

откуда

$$y_k = \frac{K-1}{p}. \quad (174)$$

Такую обмотку будем называть **л е в о й п р о с т о й п о с л е д о в а т е л ь н о й о б м о т к о й**, так как после полного обхода обмотки по коллектору сдвигаемся на одно коллекторное деление влево (фиг. 108, б).

Составление такой обмотки начинаем с крайнего правого проводника из лежащих под полюсом  $N_1$ , а именно с проводника № 3, или, что то же, с коллекторной пластины № 3, ставя на ней щетку  $b_1$ . Нетрудно убедиться в том, что вторую щетку  $b_2$  придется поставить на коллекторной пластине № 6.

Чтобы обе щетки стояли под углом  $\frac{\pi}{2}$  друг к другу, нужно щетку  $b_1$  несколько сдвинуть, как показано на фиг. 108, б; тогда она будет касаться не только коллекторной пластины № 3, но и коллекторной пластины № 4, вследствие чего замкнет накоротко проводники № 4 и 9. Прочие проводники составят (фиг. 108, б), как и на фиг. 108, а, две параллельные ветви — одну северную и одну южную:

$$-b_1 \left\{ \begin{array}{l} (3) - \overset{\times}{3} - (8) - \overset{\times}{8} - (2) - \overset{\times}{2} - (7) - \overset{\times}{7} - (1) - \overset{\times}{1} - (6) \\ (4) - \overset{\circ}{10} - (10) - \overset{\circ}{5} - (5) - \overset{\circ}{11} - (11) - \overset{\circ}{6} - (6) \end{array} \right\} + b_2$$

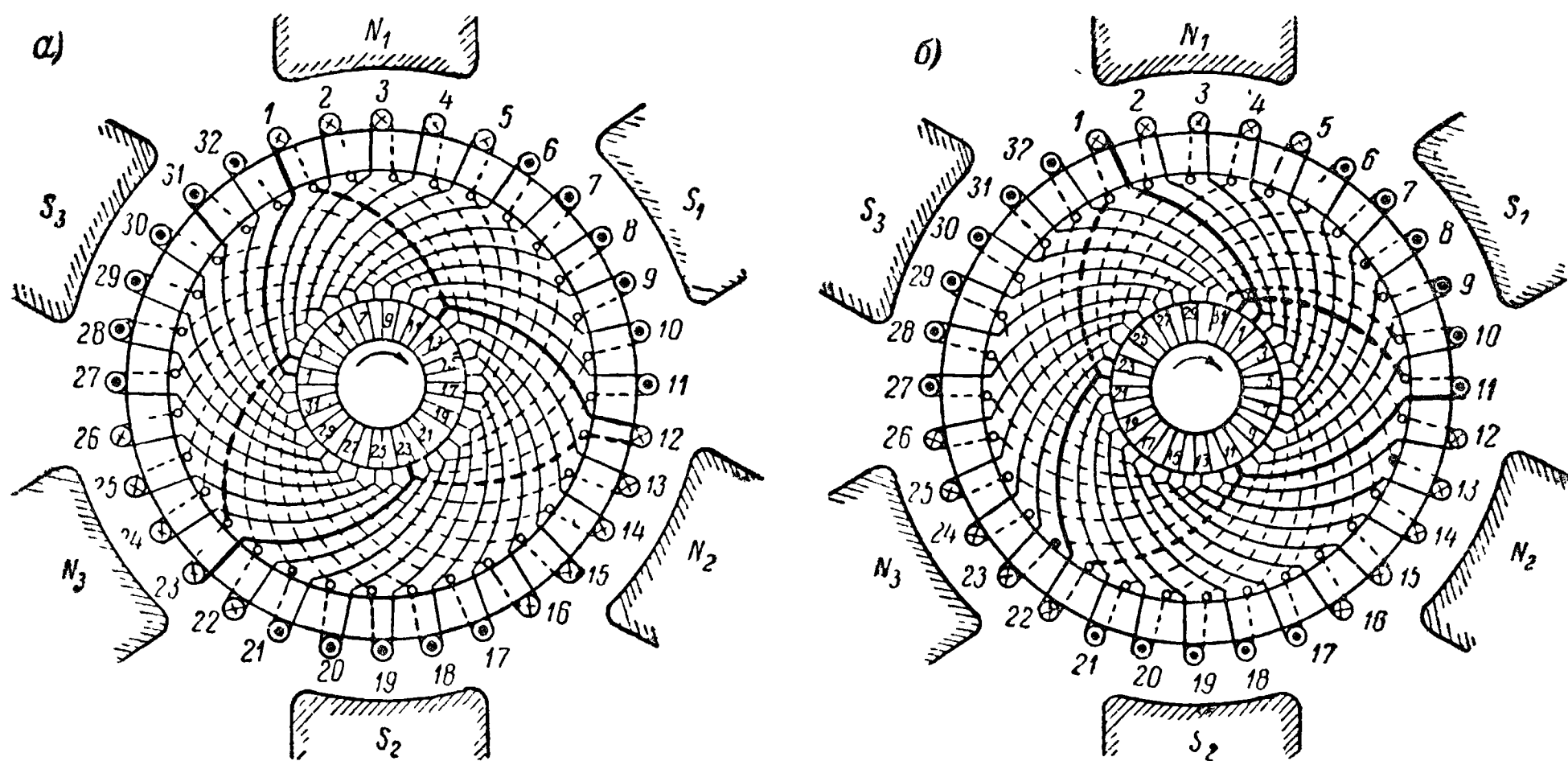
Число активных проводников в обеих ветвях получилось, как и на фиг. 108, а, неодинаковым, но при надлежащем числе  $s$  активных проводни-

ков в обмотке этим неравенством можем пренебречь и можем вычислить э. д. с. якоря по формуле (158), подставляя в нее  $q = s/2$ .

В нашем примере четырехполюсной машины ( $p = 2$ ) оказалось возможным осуществить как правую, так и левую простую последовательную обмотку. При  $p > 2$  возможно осуществление либо только правой, либо только левой простой последовательной обмотки, либо невозможно ни то ни другое, все зависит от соотношения  $K = s$  и  $p$ . Таким образом, при заданном  $p$  число  $K = s$  не может быть произвольным, а должно давать

$$y_k = \frac{K \pm 1}{p} = \text{ц. ч.} \quad (175)$$

при принятии в числителе знака плюс или минус.



Фиг. 109. Простая последовательная обмотка кольцевого якоря

$$\text{а) } K = 32; p = 3, \quad y_k = \frac{K + 1}{p} = \frac{32 + 1}{3} = 11;$$

$$\text{б) } K = 32, p = 3: y_k = \frac{-K - 1}{p} = \frac{-32 - 1}{3} = -11.$$

На фиг. 109, а представлена последовательная обмотка для случая  $K = 32$ ,  $p = 3$ , а на фиг. 110, а — для случая  $K = 31$ ,  $p = 3$ . Как видим, в первом случае (фиг. 109, а) возможна только правая последовательная обмотка с шагом по коллектору  $y_k = \frac{32 + 1}{3} = 11$ , а во втором случае (фиг. 110, а) — только левая последовательная обмотка с  $y_k = \frac{31 - 1}{3} = 10$ .

б) Простая последовательная обмотка с правым и левым обходом. При составлении простых последовательных обмоток, как правой (фиг. 108, а), так и левой (фиг. 108, б), мы двигались по обмотке вправо, делали правый обход обмотки. Однако мы могли бы составить простые последовательные обмотки, совершая левый обход обмотки, как это показано на фиг. 108, в и фиг. 108, г

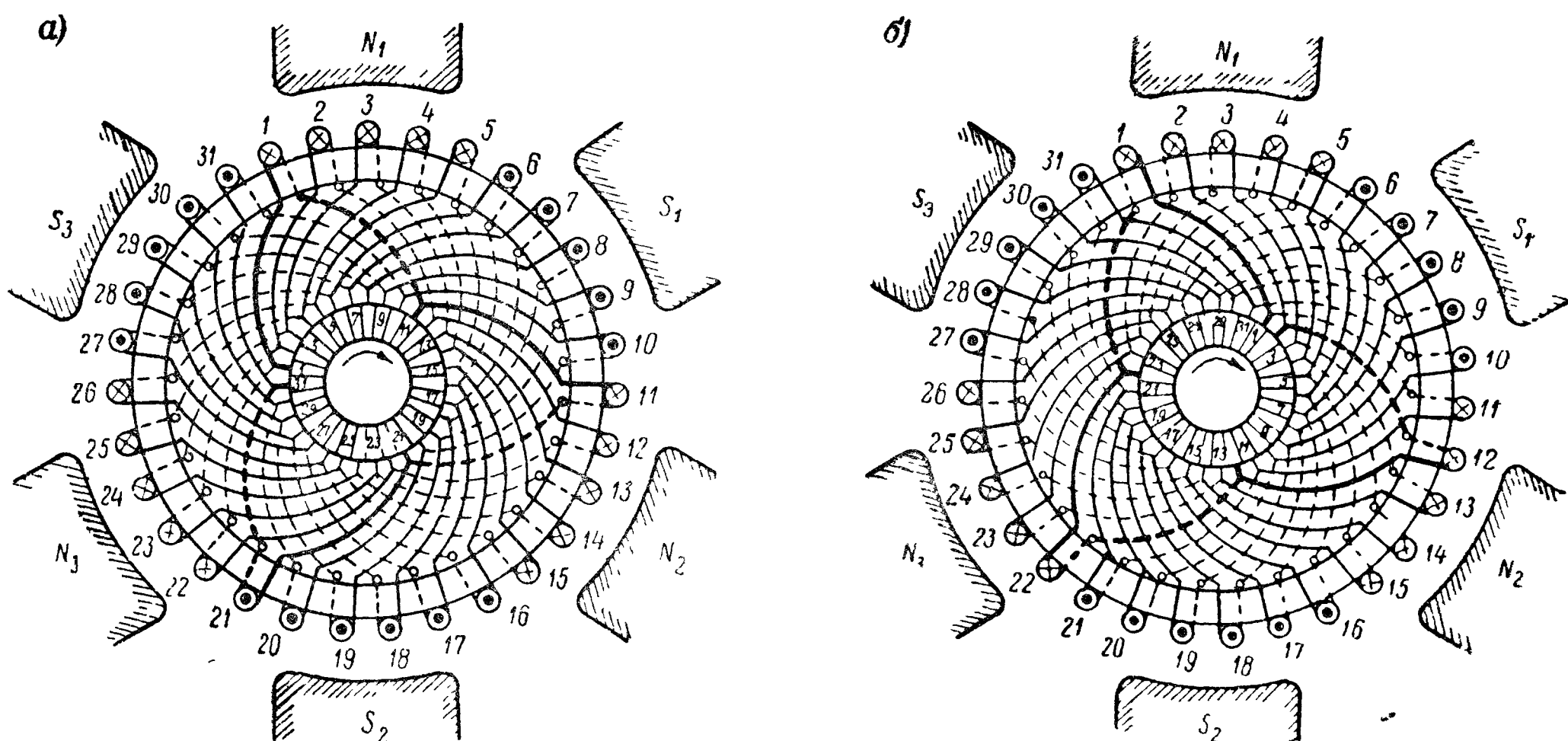
Делая левый обход обмотки, нужно в формуле для  $y_k$  брать перед  $K$  знак минус, поэтому в случае фиг. 108, в для правой обмотки с левым обходом получим шаг по коллектору:

$$y_k = \frac{-K + 1}{p} = \frac{-11 + 1}{2} = -5,$$

а в случае фиг. 108, *г* для левой обмотки с левым обходом шаг.

$$y_k = \frac{-K-1}{p} = \frac{-11-1}{2} = -6$$

Мы рассматривали случай фиг. 108, на котором  $p = 2$ , т. е. когда одинаково возможны правая и левая обмотки, и убедились, что замена правого обхода на левый обход не меняет характера обмотки; правая обмотка остается правой, а левая — левой, но теперь при изменении направления обхода с правого на левый абсолютное значение шага по коллектору в случае правой обмотки (рис. 108, *в*) получается меньше ( $y_k = -5$ ), чем в случае левой обмотки ( $y_k = -6$ ) (фиг. 108, *г*)



Фиг. 110 Простая последовательная обмотка кольцевого якоря

$$а) K = 31, p = 3, y_k = \frac{K-1}{p} = \frac{31-1}{3} = 10$$

$$б) K = 31, p = 3, y_k = \frac{-31+1}{3} = 10$$

В случаях же, когда  $p > 2$  и возможна при правом обходе только правая обмотка (фиг. 109, *а*) или только левая обмотка (фиг. 110, *а*), то при замене правого обхода на левый обход, т. е. заменяя в (175) перед  $K$  знак плюс на минус, нужно поменять и знак перед единицей. Это значит, что если при правом обходе возможна только правая обмотка (фиг. 109, *а*), то при левом обходе возможна только левая обмотка (фиг. 109, *б*), и наоборот, изменяя правый обход на левый в случае, когда при правом обходе возможна только левая обмотка (фиг. 110, *а*), необходимо изменить знак и перед единицей, т. е. перейти к правой обмотке (фиг. 110, *б*).

Таким образом, в случае, когда  $p > 2$ , изменяя направление обхода с правого на левый, мы можем правую простую последовательную обмотку превратить в левую, и наоборот: левую простую последовательную обмотку — в правую.

В общем виде шаги по обмотке можно при учете правого и левого обходов написать так (фиг. 109, *а*, *б* и 110, *а*, *б*):

$$y_s = y_k = \frac{\pm s \pm 1}{p} = \frac{\pm K \pm 1}{p}. \quad (176)$$

**в) Регулярная и скачкообразная простая последовательная обмотка.** При одном и том же направлении сдвига в магнитном поле (правом или левом) и одном и том же направлении обхода по якорю (правом или левом) можно произвести захват по одному



активному проводнику под всеми одноименными полюсами, делая это в порядке встречаемых при обходе одноименных полюсов, как это мыслилось выше, но можно сделать то же, идя по обмотке скачкообразно, а именно, пропуская каждый раз один одноименный полюс, либо два одноименных полюса и т. д., т. е. идя через два, три и т. д. двухполюсных деления ( $2\tau$ ). При таком скачкообразном обходе обмотки, для того чтобы прежде чем присоединиться к проводнику, смежному с исходным, захватить по одному проводнику под всеми одноименными полюсами, нужно совершить столько полных обходов по якорю, сколько двойных полюсных делений  $h$  мы проходим при каждом скачкообразном шаге  $y_s = y_k$ . Вследствие этого формулу для определения  $y_k$  нужно в этом случае писать так

$$y_k p = \pm K h \pm 1,$$

откуда

$$y_s = y = \frac{\pm K h \pm 1}{p} \quad (177)$$

Эта формула годится и для ранее рассмотренного нормального обхода по якорю, т. е. без скачков, если в ней положить  $h = 1$ . Таким образом, формулой (177) можно пользоваться как обобщенной формулой для шага простой последовательной обмотки.

Простую последовательную обмотку при  $h = 1$  будем называть регулярной, а при  $h > 1$  — скачкообразной простой последовательной обмоткой.

Для иллюстрации на фиг. 111 дана скачкообразная правая последовательная обмотка с правым обходом для следующих данных:  $K = 32$ ,  $p = 5$ ,  $h = 2$ ,  $y_k = \frac{32 \cdot 2 + 1}{5} = +13$ .

Очевидно, что для возможности осуществления на кольцевом якоре скачкообразной простой последовательной обмотки также должны быть выполнены некоторые условия. Первое условие состоит в том, чтобы числа  $h$  и  $p$  были, как и числа  $K$  и  $p$  (о чем говорилось раньше), взаимно простыми. Действительно, предположим, что они имеют общий наибольший делитель  $d$ , и введем обозначения

$$\frac{h}{d} = h', \quad \frac{p}{d} = p' \quad (178)$$

Тогда

$$y_k = \frac{\pm K h \pm 1}{p} = \frac{\pm K h' \pm \frac{1}{d}}{p'} = \pm \frac{K h'}{p'} \pm \frac{1}{d p'} = \pm \frac{K h'}{p} \pm \frac{1}{p}. \quad (179)$$

Как видим,  $y_k$  получится дробным числом, так как представляет сумму двух дробей с разными знаменателями, а это дробное значение  $y_k$  недопустимо, следовательно, числа  $h$  и  $p$  не могут иметь общего наибольшего делителя  $d > 1$ , т. е. должны быть взаимно простыми, что и требовалось доказать.

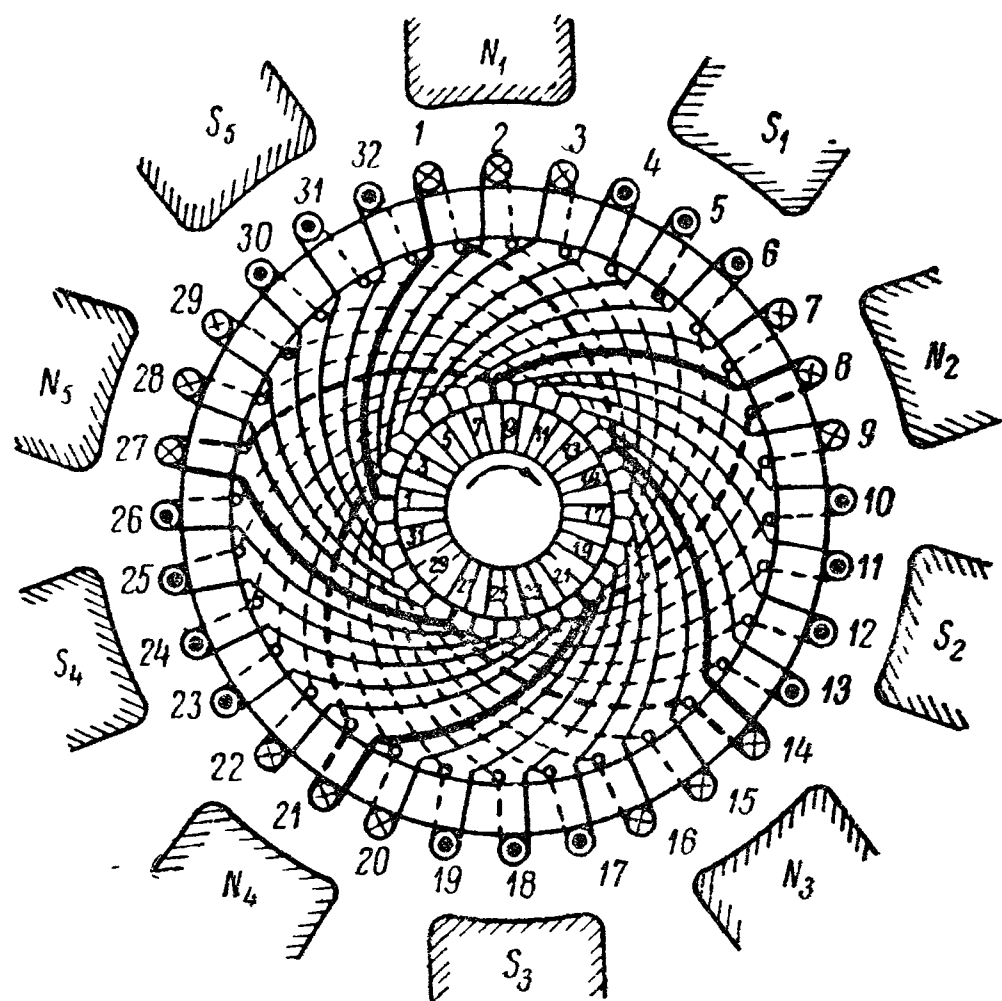
Второе условие состоит в том, что  $h$  должно быть меньше  $p$ . В самом деле, предположим, что  $h$  больше  $p$ , тогда можно написать:

$$h = p + b, \quad (180)$$

где  $b$  — целое положительное число, меньшее  $p$ . Подставив это выражение в (179), получим

$$y_k = \frac{\pm K h \pm 1}{p} = \frac{\pm K (p + b) \pm 1}{p} = \pm K + \frac{\pm K b \pm 1}{p}. \quad (179a)$$

Первый член  $\pm K$  в последней части этого выражения играет такую же роль, как период  $= 2\pi$  в аргументе тригонометрической функции. Действительно, выйдя из какой-нибудь коллекторной пластины и пройдя  $+K$  или  $-K$  пластин, мы приходим к исходной пластине, поэтому при  $h = p + b$  шаг обмотки  $y_k$  получается таким же, как и при  $h = b$ , где  $b < p$ , этим доказывается необходимость выполнения второго указанного нами условия, т. е. что  $h$  должно быть меньше  $p$ .



Фиг. 111 Скачкообразная простая последовательная обмотка

$$K = 32, \quad p = 5, \quad h = 2,$$

$$y_k = \frac{K h + 1}{p} = \frac{32 \cdot 2 + 1}{5} = \frac{65}{5} = 13$$

На основании этого условия можно написать

$$p = h + \gamma, \quad (181)$$

где  $\gamma$  — целое число; причем  $\gamma$  не может равняться  $h$ , так как тогда мы получили бы  $h = \frac{p}{2}$ , т. е. у  $p$  и  $h$  был бы общий делитель  $h$ , а это, как было доказано выше, недопустимо.

Таким образом, должно существовать соотношение.

$$h > \gamma \text{ или } h < \gamma.$$

Иначе говоря, должно быть либо

$$h > \frac{p}{2}, \text{ а тогда } \gamma < \frac{p}{2},$$

либо

$$h < \frac{p}{2}, \text{ а тогда } \gamma > \frac{p}{2}$$

Докажем, что практически следует всегда брать  $h < \frac{p}{2}$ . Предположим, что  $h < \frac{p}{2}$  и подставим  $h = p - \gamma$  в выражение (179):

$$y_k = \frac{\pm Kh \pm 1}{p} = \frac{\pm K(p - \gamma) \pm 1}{p} = \pm K + \frac{\mp K\gamma \pm 1}{p}.$$

Здесь опять первый член  $\pm K$  в последней части написанного выражения играет роль периода  $\pm 2\pi$  в аргументе тригонометрической функции, а потому можно написать:

$$y_k = \frac{\pm Kh \pm 1}{p} = \frac{\mp K\gamma \pm 1}{p}$$

Это значит, что обмотка с правым (+) или с левым (—) обходом и скачком  $h$  тождественна обмотке с левым (—) или с правым (+) обходом и скачком  $\gamma = p - h$ .

Тождественность обмоток понимается в смысле их свойств по отношению к коллектору, но так как было взято  $h < \frac{p}{2}$ , а следовательно,  $\gamma > \frac{p}{2}$ , то преимущество будет за обмоткой со скачком  $h < \frac{p}{2}$ , так как в ней длина лобовых соединений будет короче, чем в обмотке со скачком  $h > \frac{p}{2}$ . Таким образом, скачок  $h$  следует брать меньше  $p/2$ .

Резюмируя, можем установить следующие условия, выполнение которых необходимо для получения по (179) скачкообразной простой последовательной обмотки с возможно короткими лобовыми соединениями:

1)  $h$  — целое число, взаимно простое с  $p$ ,

2)  $2 \leq h < \frac{p}{2}$ .

Очевидно, что:

1) при  $p = 2$ ;  $p = 3$  и  $p = 4$  скачкообразная обмотка невозможна,

2) при  $p = 5$  возможно лишь одно значение  $h = 2$ ,

3) при  $p = 6$  скачкообразная обмотка невозможна;

4) при  $p = 7$  возможны значения  $h = 2$ ,  $h = 3$ ;

5) при  $p = 8$  возможно только одно значение  $h = 3$ ;

6) при  $p = 9$  возможны два значения  $h = 2$ ,  $h = 4$  и т. д.

Для скачкообразной простой последовательной обмотки получается увеличенная затрата меди на лобовые соединения обмотки по сравнению с регулярной простой последовательной обмоткой, что является ее несомненным недостатком. Этим объясняется, почему эта обмотка не находила себе практического применения, хотя была опубликована уже в 1891 г. Арнольдом [Л. 13]. При применении скачкообразной обмотки число возможных значений  $K$  при данном  $p$  возрастает.

В самом деле, вернемся к фиг. 111, где  $K = 32$ ,  $p = 5$ . При этих данных формула (176) для регулярной простой последовательной обмотки дает

$$y_k = \frac{\pm K \pm 1}{p} = \frac{\pm 32 \pm 1}{5} \neq \text{ц. ч.},$$

т. е. регулярная простая последовательная обмотка невозможна ни при одной из возможных комбинаций знаков в числителе выражения для  $y_k$ . Взяв же формулу (177) со знаками плюс перед  $K$  и перед единицей и положив  $h = 2$ , получаем представленную

на фиг 111 скачкообразную правую простую последовательную обмотку с правым обходом:

$$y_k = \frac{Kh + 1}{p} = \frac{32 \cdot 2 + 1}{5} = +13.$$

Можно, очевидно, осуществить и скачкообразную левую простую последовательную обмотку с левым обходом при том же значении  $h = 2$ :

$$y_k = \frac{-Kh - 1}{p} = \frac{-32 \cdot 2 - 1}{5} = -13$$

г) Резюме. Сопоставление двух только что указанных возможных скачкообразных простых последовательных обмоток показывает, что наличие в числителе правой части формулы (177).

$$y_k = \frac{\pm Kh \pm 1}{p},$$

двойных знаков перед обоими членами излишне. Действительно, в общем случае (когда  $p > 2$ ) при заданных  $K$ ,  $h$  и  $p$  шаг  $y_k$  может получиться целым числом (что необходимо) лишь при одной из двух возможных комбинаций знаков, а именно: либо тогда, когда эти знаки одинаковы, либо тогда, когда они противоположны [в нашем примере (фиг 111) они должны быть одинаковыми]. Из этого следует, что практически можно остановиться на одном, любом из двух возможных, направлений обхода по обмотке. Выбирая правый обход, можем формуле (177) придать более простой вид:

$$y_k = \frac{Kh \pm 1}{p}. \quad (182)$$

Итак, в дальнейшем целесообразно пользоваться **п р а в ы м о б х о д о м**, т. е. брать всегда  $+K$ .

#### 74. Отсутствие в простой последовательной обмотке кольцевого якоря точек равного потенциала

В простой последовательной обмотке кольцевого якоря мы имеем всего две параллельные ветви. Проводники одной ветви расположены под всеми северными магнитными полюсами, проводники другой ветви — под всеми южными магнитными полюсами. Так как сумма магнитных линий, входящих в якорь, должна равняться сумме магнитных линий, выходящих из якоря, то при достаточном числе проводников на якоре обе ветви, с точки зрения индуцируемых в них э. д. с., будут практически эквивалентны, и все те несовершенства в конструкции магнитной системы, о которых говорилось в § 42, на работу простой последовательной обмотки кольцевого якоря никакого влияния не оказывают.

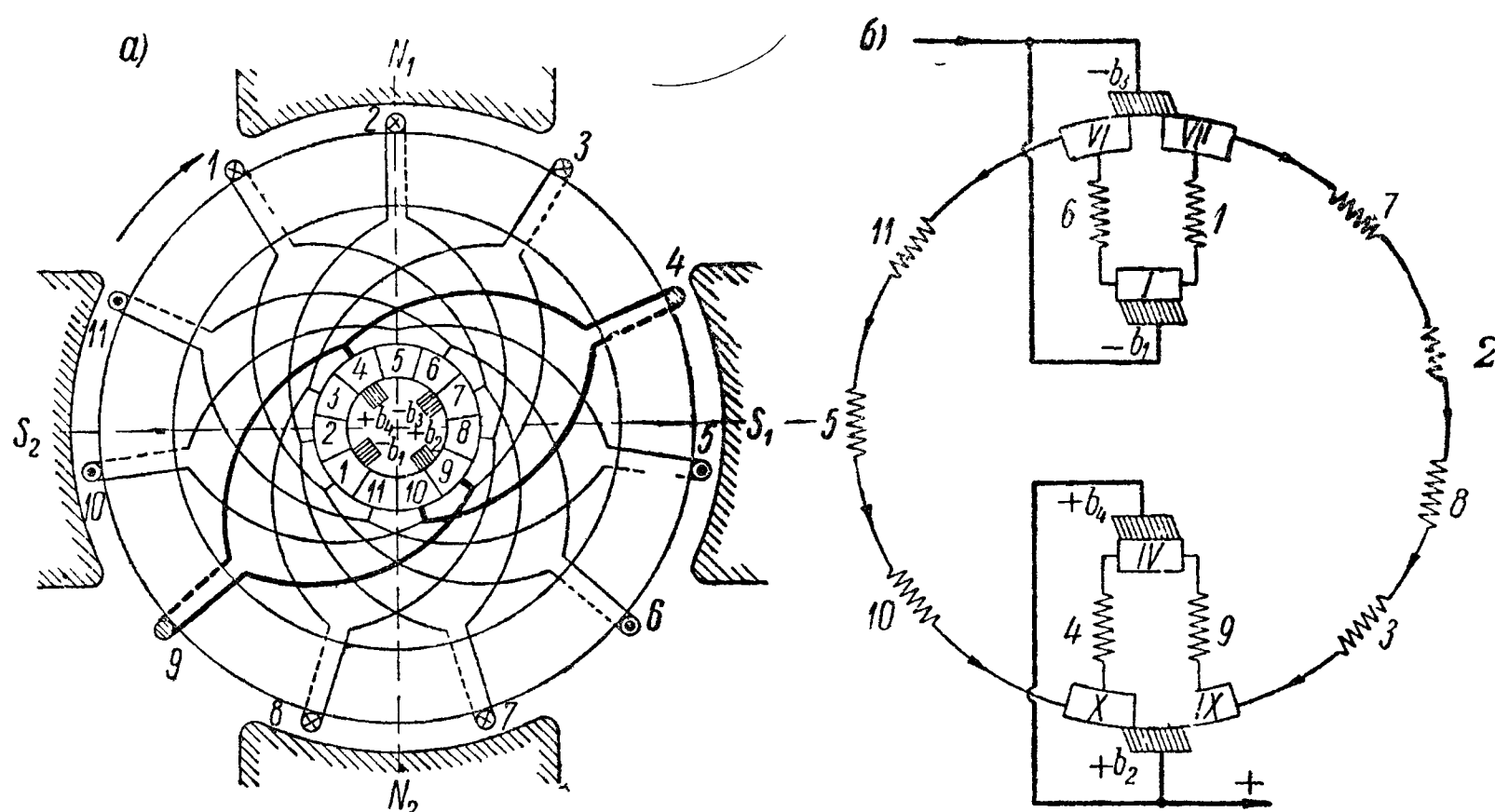
Таким образом, простая последовательная обмотка кольцевого якоря ни в каких уравнивательных соединениях не нуждается, — обстоятельство весьма важное, так как в этой обмотке, состоящей всего из двух параллельных ветвей — одной северной и одной южной — нет точек одинакового потенциала, а следовательно, не может быть и уравнивательных соединений.

#### 75. Число необходимых и число возможных зонных комплектов щеток простой последовательной обмотки кольцевого якоря; полярности щеток

В машине, снабженной простой параллельной кольцевой якорной обмоткой, щетки устанавливают в каждой нейтральной магнитной зоне, а следовательно, число зонных комплектов щеток для такой машины равно  $2p$ . При нагрузке машины каждый зонный комплект щеток отводит ток от тех параллельных ветвей обмотки, которые находятся с ним в соприкосновении. Таким образом, в параллельных кольцевых якорных обмотках, в случае отсутствия

уравнительных соединений, мы имеем принудительное распределение тока между зонными комплектами щеток

В машинах с простыми последовательными кольцевыми якорными обмотками, как мы видели, достаточно иметь всего два зонных комплекта щеток: один положительный и один отрицательный. Мы можем, однако, наложить на коллектор столько зонных комплектов щеток, сколько машина имеет нейтральных магнитных зон, т. е. сколько имеется магнитных полюсов (фиг. 112, а). Полярности зонных комплектов щеток, как нетрудно убедиться, будут чередоваться. Все положительные зонные комплекты щеток соединяем друг с другом, также и все отрицательные зонные комплекты щеток. Каждая щетка (зонный



Фиг. 112 Простая последовательная обмотка кольцевого якоря с полным числом щеток

комплект щеток) при перекрытии ею изоляционной прослойки между двумя смежными коллекторными пластинами будет замыкать накоротко столько последовательно соединенных активных проводников (секций), сколько имеется пар полюсов, но теперь (при установке  $2p$  зонных комплектов щеток) все короткозамыкаемые секции окажутся соединенными благодаря добавочным зонным комплектам щеток не только последовательно, но и параллельно (фиг. 112, б); вследствие этого ток машины будет распределяться между одноименными зонными комплектами щеток в зависимости от сопротивления контакта щеток с коллектором (сопротивлением проводников пренебрегаем).

Таким образом, при наложении на коллектор машины с простой последовательной обмоткой полного числа зонных комплектов щеток мы получим избирательное (селективное) распределение тока между одноименными зонными комплектами щеток.

На фиг. 112, а взята регулярная правая простая последовательная обмотка. При установке полного числа  $2p$  зонных комплектов щеток и придании передним лобовым соединениям обмотки симметричной формы, полярности щеток на коллекторе кольцевого якоря с правой простой последовательной обмоткой оказываются обратными полярностям щеток кольцевого якоря с правой простой параллельной обмоткой, а именно с правой стороны северного полюса получаем отрицательную щетку.



## В. ПРОИЗВОДНЫЕ, ИЛИ МНОЖЕСТВЕННЫЕ, ЗАМКНУТЫЕ ОБМОТКИ КОЛЬЦЕВОГО ЯКОРЯ

### 76. Множественные параллельные обмотки кольцевого якоря и их разновидности

Цель множественной параллельной обмотки кольцевого якоря состоит в том, чтобы на базе простой параллельной обмотки, имеющей число параллельных ветвей, равное числу полюсов машины ( $2a = 2p$ , или  $a = p$ ) создать обмотку с увеличенным числом параллельных ветвей, а именно, с  $a = mp$ , где  $m > 1$  — целое число. Коэффициент  $m$  будем называть **коэффициентом множественности**.

**а) Многократная множественная параллельная обмотка кольцевого якоря.** В простейшем виде множественная параллельная обмотка может быть выполнена путем наложения на кольцевой якорь, снабженный простой параллельной обмоткой, другой такой же простой параллельной обмотки, имеющей то же число активных проводников  $s_1$  и, следовательно, то же число коллекторных пластин  $K_1$ .

Наложение на якорь дополнительной идентичной простой параллельной обмотки делается таким способом, чтобы не нарушать соединений проводников первоначальной обмотки друг с другом и с их коллекторными пластинами и таких же соединений у накладываемой обмотки. Проводники дополнительной обмотки укладываются между проводниками первоначальной обмотки, а коллекторные пластины дополнительной обмотки — между коллекторными пластинами первоначальной обмотки. Таким образом, на якоре получаем две тождественные простые параллельные обмотки, ничем не связанные между собой. Общее число активных проводников на якоре  $s$  и общее число коллекторных пластин  $K$  получаются в два раза больше, чем для каждой из двух идентичных простых параллельных обмоток.

$$s = 2s_1; \quad K = 2K_1.$$

Для того чтобы при вращении якоря осуществлялась в каждый данный момент времени связь обеих простых параллельных обмоток с коллекторными щетками, нужно ширину щеток сделать больше ширины коллекторного деления.

Так как в каждой из простых параллельных обмоток выполняется равенство  $a_1 = p$ , где  $a_1$  — число пар ее параллельных ветвей, а  $p$  — число пар полюсов машины, то для совокупности обеих простых параллельных обмоток, образующих множественную параллельную обмотку, получим:

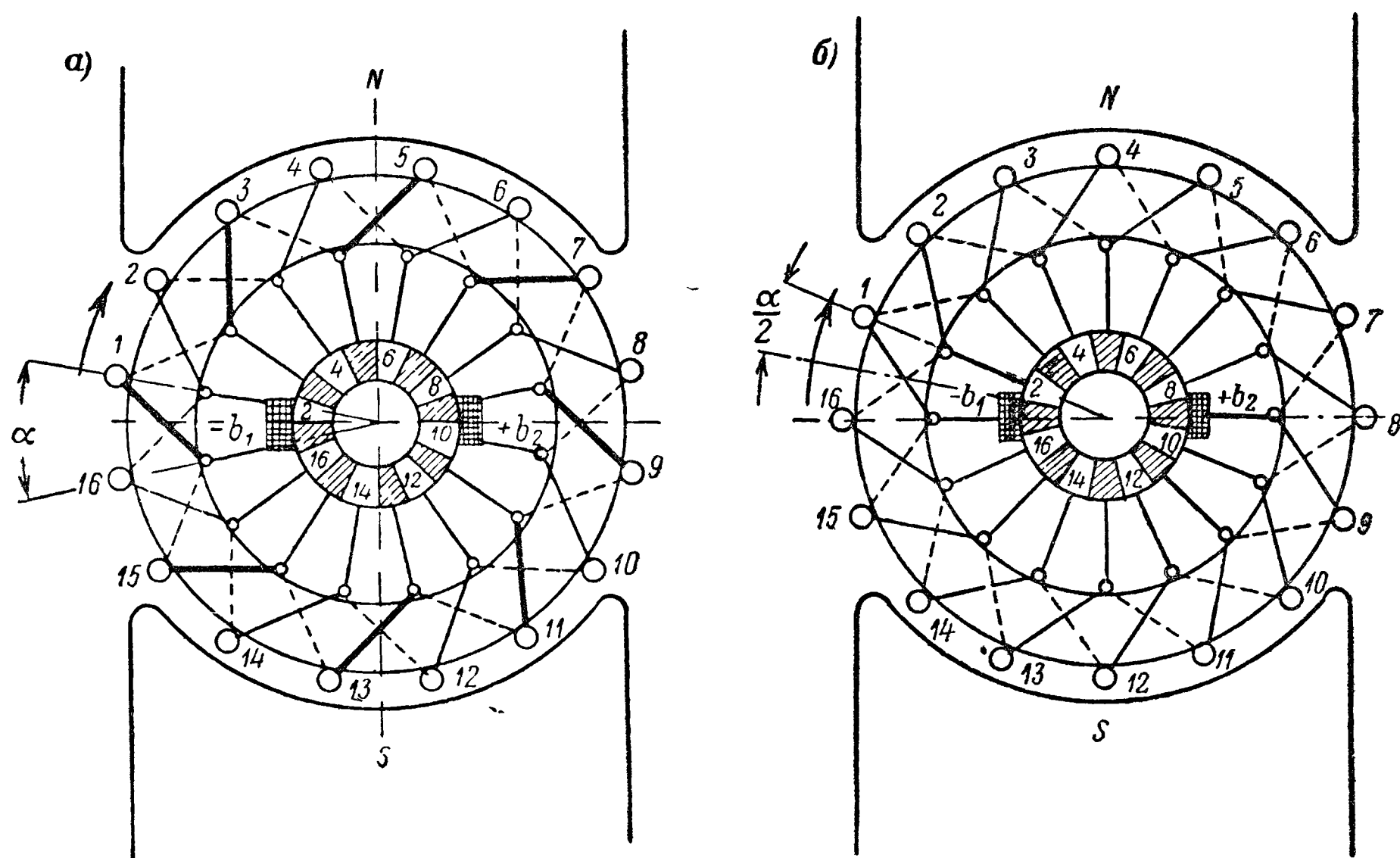
$$a = 2a_1 = 2p,$$

т. е. при наложении на якорь двух идентичных простых параллельных обмоток число параллельных ветвей обмотки, а следовательно, и число пар параллельных ветвей обмотки удваивается по сравнению с их числом у исходной обмотки.

Для иллюстрации на фиг. 113, а показана двухполюсная машина ( $p = 1$ ) с первоначальной простой параллельной обмоткой, имеющей 8 проводников и такое же число коллекторных пластин ( $s_1 = K_1 = 8$ ), обмотка вычерчена жирно, а ее коллекторные пластины заштрихованы. Дополнительная обмотка имеет также 8 проводников и 8 коллекторных пластин; эта обмотка вычерчена тонкой линией, ее пластины, вдвинутые между первоначальными, не заштрихованы.

В момент времени, представленный на фиг. 113, а, все четыре параллельные ветви обмотки имеют по одинаковому числу проводников, одинаково расположенных по отношению к полюсам, а следовательно, в них будут индуцироваться одинаковые э. д. с. При повороте якоря на угол  $\alpha/2$  (фиг. 113, б),

равенство э. д. с. параллельных ветвей нарушится, так как теперь щетки  $b_1$  и  $b_2$  выключают из параллельных ветвей дополнительной обмотки по одной секции (№ 16 и № 8) и замыкают их накоротко; через  $\alpha$  обозначен угол, соответствующий коллекторному делению. При повороте якоря на угол  $\frac{\alpha}{2}$  относительно положения его на фиг. 113, б восстановится положение, идентичное показанному на фиг. 113, а. При повороте якоря еще на угол  $\frac{\alpha}{2}$  получим кар-



Фиг. 113. Двухполюсная машина с многократной множественной параллельной обмоткой.

тину, подобную фиг. 113, б, с той разницей, что теперь щетки выключают по одному проводнику из каждой параллельной ветви первоначальной обмотки.

Пренебрегая тем неравенством в величинах э. д. с. отдельных параллельных ветвей, которое будет получаться из-за неодинакового числа проводников каждой ветви в моменты, соответствующие фиг. 113, б и в промежуточные, мы можем попрежнему пользоваться для вычисления э. д. с. якоря формулой (158), подставляя в нее

$$q = \frac{s}{2a}.$$

При наложении на кольцевой якорь вышеуказанным способом  $g$  идентичных простых параллельных обмоток мы получим увеличение в  $g$  раз числа параллельных ветвей ( $a = ga_1$ ), числа активных проводников на якоре ( $s = gs_1$ ) и числа коллекторных пластин ( $K = gK_1$ ). Коэффициент увеличения числа параллельных ветвей — коэффициент множественности — мы условились обозначать через  $m$ ; поэтому можем написать, что в получаемой множественной параллельной обмотке число ее параллельных ветвей  $a$  будет в  $m$  раз больше, чем в каждой из составляющих ее простых параллельных обмоток:  $a = ma_1$ , а так как  $a_1 = p$ , то получаем:

$$a = mp. \quad (183)$$

В нашем случае коэффициент множественности  $m$  равен числу самостоятельных, независимых простых параллельных обмоток, из которых они составлены, т. е. имеем:

$$m = g,$$

где  $g$  — кратность замыкания множественной параллельной обмотки в отдельные независимые простые параллельные обмотки.

Рассматривая фиг. 113, а, можно вывести правило, по которому нужно производить соединение 16 проводников, чтобы получить представленную на нем множественную параллельную обмотку, а именно: начав с проводника № 1, нужно составлять спираль, соединяя проводники через один: 1—3—5 и т. д. Используя половину проводников (все с нечетными номерами), мы совершим полный обход окружности якоря и придем опять к проводнику № 1, вследствие чего получим замкнутую цепь. Оставшиеся нетронутыми четные проводники при соединении их по тому же правилу дадут, очевидно, вторую замкнутую цепь.

Для образования множественной параллельной обмотки, состоящей из 3 простых параллельных обмоток, придется производить соединение проводника № 1 с № 4, № 4 с № 7 и т. д., т. е. пропускать каждый раз столько проводников, сколько на первую обмотку наложено дополнительных.

Пользуясь ранее введенными понятиями о шагах обмотки, мы можем написать для рассматриваемой нами множественной параллельной обмотки, составленной из  $g$  простых параллельных обмоток:

$$y_s = y_k = g,$$

или, так как  $g = m$ .

$$y_s = y_k = m.$$

Действительно, при наложении на якорь дополнительных идентичных обмоток мы не нарушаем соединений первоначальной обмотки, для которой имели:

$$y_s = y_k = +1.$$

Здесь 1 означает для шага по якорю одно якорное деление, а для шага по коллектору — одно коллекторное деление, но теперь эти деления разбиваются дополнительными обмотками на  $m$  частей.

Исходная простая параллельная обмотка в примере, рассмотренном нами на фиг. 113, была правой, поэтому мы получили для определения ее шагов по якорю и коллектору выражение:  $y_s = y_k = +m$ . Если бы мы взяли в качестве исходной обмотки левую простую параллельную обмотку и наложили на нее такую же или несколько таких же левых простых параллельных обмоток, то для образуемой таким образом множественной параллельной обмотки мы получили бы:  $y_s = y_k = -m$ . В общем виде можем поэтому написать:

$$y_s = y_k = \pm m. \quad (184)$$

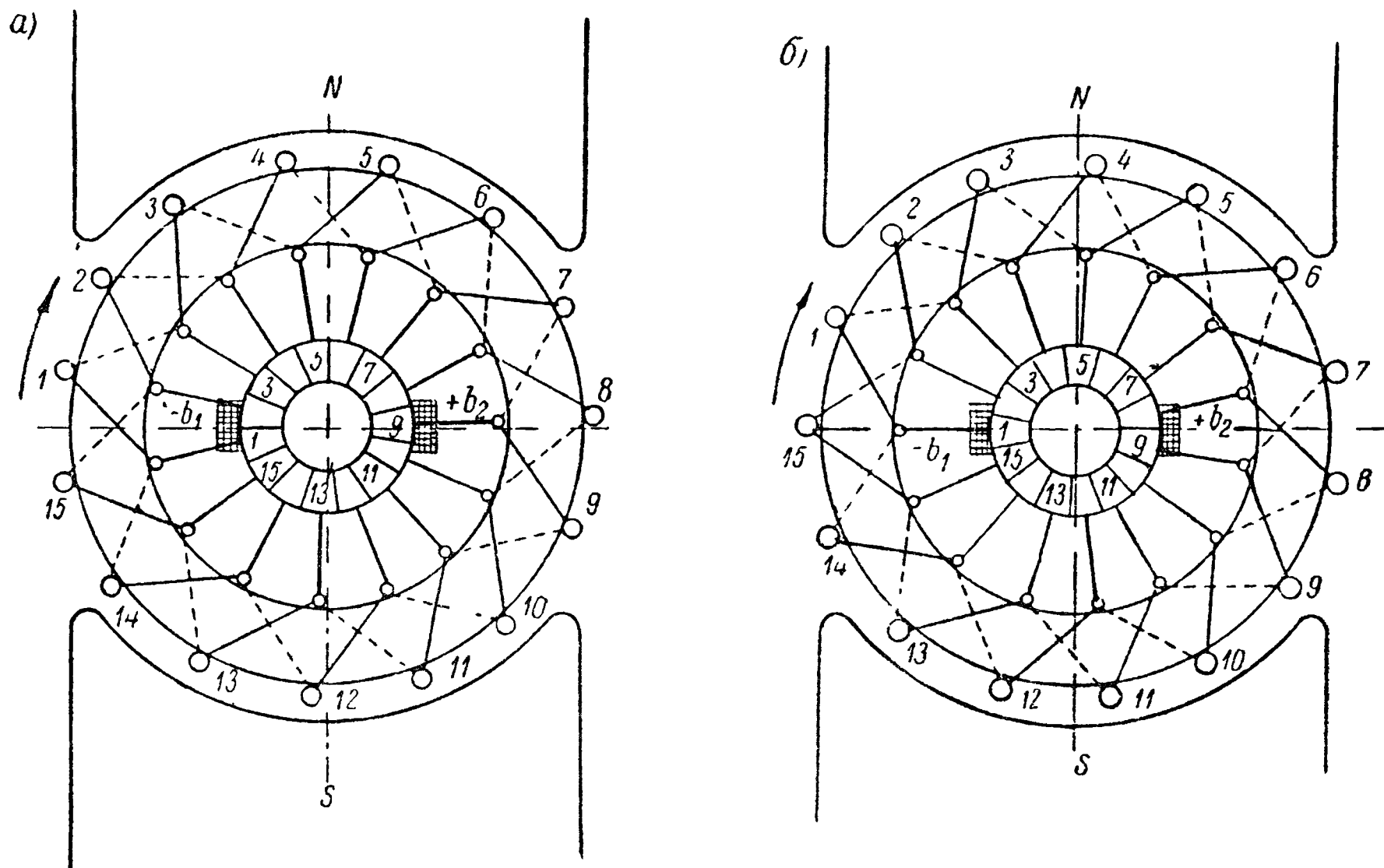
Множественную параллельную обмотку, состоящую из нескольких одинаковых простых параллельных обмоток, будем называть **многократной множественной параллельной обмоткой**. Характерным признаком ее является то, что  $y_s = y_k = \pm m$ , и число коллекторных пластин  $K$  делится на  $m$ :

$$\frac{K}{m} = \text{ц. ч.}$$

В зависимости от значения  $m$  можем пользоваться терминами: двойственная ( $m = 2$ ), тройственная ( $m = 3$ ), четверичная ( $m = 4$ ), пятеричная ( $m = 5$ ) и т. д. множественная параллельная обмотка.

б) **Однократная множественная параллельная обмотка кольцевого якоря.** Сохраним тот же способ соединения проводников через один, что на фиг. 113,

но возьмем на якоре число проводников  $s = 15$ . Произведя указанное соединение проводников, убедимся в том, что к исходному проводнику № 1 мы вернемся только после двух обходов по окружности якоря, причем все проводники окажутся соединенными в общую замкнутую цепь (фиг. 114, а). Поставив на коллекторе по геометрической магнитной нейтрали две щетки, каждая шириною больше одного коллекторного деления, мы получим при положении



Фиг. 114 Двухполюсная машина с однократной множественной параллельной обмоткой.

якоря, представленном на фиг. 114, а, под щеткой  $b_2$  одну короткозамкнутую секцию, а именно № 8, по отношению к щеткам вся обмотка распадается на следующие четыре параллельные ветви — две северные и две южные

$$-b_1 \left\{ \begin{array}{l} (1) - \overset{\times}{1} - (3) - \overset{\times}{3} - (5) - \overset{\times}{5} - (7) - \overset{\times}{7} - (9) \\ (2) - \overset{\times}{2} - (4) - \overset{\times}{4} - (6) - \overset{\times}{6} - (8) \\ (1) - \overset{\odot}{14} - (14) - \overset{\odot}{12} - (12) - \overset{\odot}{10} - (10) \\ (2) - \overset{\odot}{15} - (15) - \overset{\odot}{13} - (13) - \overset{\odot}{11} - (11) - \overset{\odot}{9} - (9) \end{array} \right\} + b_2$$

Здесь цифрами в скобках обозначены коллекторные пластины, цифрами без скобок — проводники. Как видим, число проводников в отдельных ветвях не одинаково. Но, предполагая  $s$  достаточно большим, можем попрежнему вычислять э. д. с. якоря по (158), подставляя  $q = s/2a$ .

Обмотка, данная на фиг. 114, является тоже множественной параллельной, для нее  $m = 2$ , но здесь, в отличие от обмотки на фиг. 113, замыкание обмотки получается всего один раз после обхода всех проводников. Эту обмотку будем называть однократно-замкнутой множественной параллельной обмоткой, или однократной множественной параллельной обмоткой. Характерными признаками ее являются соотношения:  $y_s = y_k = \pm m$ ;  $\frac{k}{m} \neq \text{ц. ч.}$ ; иначе говоря,  $K$  и  $m$  не имеют общего делителя, числа — взаимно простые

в) Многократно-однократная множественная параллельная обмотка кольцевого якоря. Множественную параллельную обмотку можно по-



лучить, накладывая на якорь несколько, например  $g$ , однократных множественных параллельных обмоток, имеющих каждая коэффициент множественности  $m'$ , т. е. с числом параллельных ветвей  $a' = m'p$ .

Вся обмотка в целом будет иметь число параллельных ветвей

$$a = gm'p = mp,$$

где

$$m = gm'.$$

Ширина каждой коллекторной щетки  $b_B$  должна быть такой, чтобы при всех положениях якоря относительно щеток не нарушалась электрическая связь с ними параллельных ветвей обмотки, т. е. при  $g$  наложенных независимых обмотках должно выполняться условие

$$b_B > g\tau_k.$$

Рассмотренную только что якорную обмотку следует называть **многokратно-однократной множественной параллельной обмоткой**.

Когда  $m' = 1$ , то наложенные на якорь однократные множественные обмотки являются простыми, и тогда  $g = m$ ; если же  $m' > 1$ , то  $g < m$ , а потому вообще можем сказать, что коэффициент  $g$ , или число самостоятельных замкнутых обмоток, на которые распадается в данном случае множественная параллельная обмотка, меньше или равно коэффициенту множественности

$$g \leq m. \quad (185)$$

г) Резюме. Резюмируя, можем сказать, что множественная параллельная обмотка может быть трех видов:

1) многократная:

$$a = mp, \quad \frac{K}{m} = \text{ц. ч.}, \quad g = m,$$

2) однократная

$$a = mp, \quad \frac{K}{m} \neq \text{ц. ч.}, \quad g = 1,$$

3) многократно-однократная

$$a = mp, \quad \frac{K}{m} = \text{ц. ч.} \quad 1 < g < m.$$

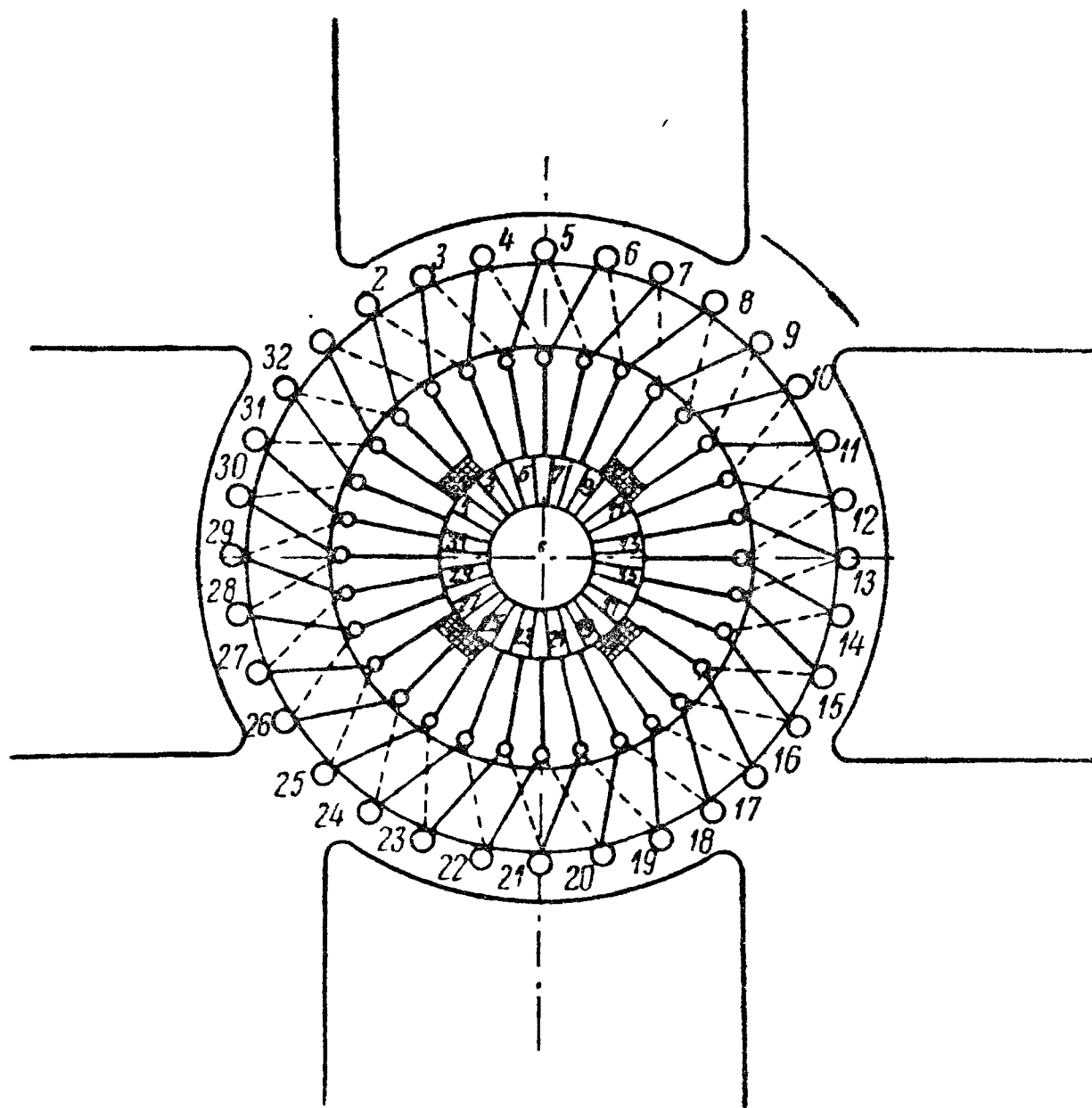
## 77. Условия симметрии множественных параллельных обмоток кольцевого якоря

Рассматривая двухполюсную машину с кольцевым якорем, снабженным простой параллельной обмоткой с нечетным числом проводников (фиг. 103), мы условились считать ее практически симметричной, так как опыт показал, что такая обмотка работает вполне удовлетворительно, несмотря на то, что в ней поочередно, то в одной, то в другой параллельной ветви обмотки, число активных проводников получается на единицу больше.

На этом основании, имея двухполюсную машину с множественной параллельной обмоткой (фиг. 113), состоящей из двух одинаковых простых параллельных обмоток, мы можем считать ее также практически симметричной, так как в этом случае обе независимых простых параллельных обмотки поочередно будут иметь в своих параллельных ветвях по одному проводнику больше, чем другая простая параллельная обмотка.

Рассмотрим теперь четырехполюсную машину с множественной параллельной обмоткой на кольцевом якоря, состоящей из двух одинаковых простых параллельных обмоток:  $2p = 4$ ,  $a = 4$ ;  $s = 32$  (фиг. 115). Такая машина

будет эквивалентна  $p = 2$  двухполюсным машинам, жестко механически соединенным друг с другом, из которых каждая имеет множественную параллельную обмотку, распадающуюся на две простых параллельных обмотки



Фиг. 115. Четырехполюсная машина с множественной параллельной обмоткой.

а уравнильные соединения между равнопотенциальными точками обеих простых параллельных обмоток — уравнильными соединениями II (второго) рода. Об устройстве их будет сказано дальше применительно к обмоткам барабанных зубчатых якорей

из 8 активных проводников (фиг. 115). Из этого следует, что многократная множественная параллельная обмотка кольцевого якоря будет практически симметричной, если  $\frac{2p}{a} =$  целому числу, так как в этом случае все проводники будут расположены относительно полюсов в одинаковых магнитных условиях

При этом необходимо чтобы и каждая из простых параллельных обмоток была практически симметричной, для чего необходимо, как мы видели (§ 71) чтобы  $\frac{K}{a} =$  целому числу

Уравнильные соединения, устраиваемые в каждой из простых параллельных обмоток, будем попрежнему называть уравнильными соединениями I (первого) рода

## 78. Множественные последовательные обмотки кольцевого якоря и их разновидности

а) Многократная множественная последовательная обмотка кольцевого якоря. Если на кольцевой якорь многополюсной ( $p > 1$ ) машины, снабженной регулярной правой простой последовательной обмоткой, наложить другую такую же регулярную простую параллельную обмотку, расположив ее проводники и коллекторные пластины между проводниками и, соответственно, между коллекторными пластинами первой, то получим обмотку с числом ветвей, в два раза большим.

Ширина каждой из коллекторных щеток должна быть теперь сделана больше коллекторного деления. Это необходимо для того, чтобы при всех положениях якоря не терялась электрическая связь щеток с обеими независимыми обмотками.

Увеличивая число накладываемых обмоток, мы дойдем до  $2a = 2p$ , как в простой параллельной обмотке, но по характеру своего осуществления такая обмотка будет отличаться от простой параллельной обмотки. В последней все проводники, составляющие одну параллельную ветвь, лежат только под одним и тем же магнитным полюсом, либо северным, либо южным. Здесь же каждая ветвь имеет проводники, лежащие под всеми одноименными магнитными полюсами, т. е. одна параллельная ветвь имеет проводники, лежащие под всеми северными магнитными полюсами, другая — проводники, лежащие под всеми южными магнитными полюсами. Очевидно, что, увеличивая дальше

число накладываемых на якорь простых последовательных обмоток, можем получить  $2a > 2p$ . Точно так же очевидно, что в рассматриваемой множественной последовательной обмотке ширина щетки должна быть такой, чтобы не терялась ее электрическая связь со всеми независимыми обмотками, т. е. должна быть больше  $a$  коллекторных делений  $\tau_k$ . На практике ее берут не менее  $a + 1$  коллекторных делений.

Обмотка, состоящая из нескольких ( $g$ ) простых последовательных обмоток, может быть названа **многократной множественной последовательной обмоткой**.

В этой обмотке число активных проводников  $s$  и число коллекторных пластин  $K$  в  $g$  раз больше, чем в каждой простой последовательной обмотке, где  $g$  — число наложенных на якорь независимых простых последовательных обмоток:

$$s = gs', \quad K = gK'$$

Число пар параллельных ветвей всего якоря напишется так:

$$a = g. \quad (186)$$

Для простой последовательной обмотки мы имели (§ 72):  $y_k \cdot p = K \pm 1$ . Совершив полный обход по якорю, по одной из независимых об-

моток мы должны прийти к той же самой коллекторной пластине, но так как теперь каждое коллекторное деление распалось на  $g = a$  коллекторных делений, то должно выполняться уравнение:

$$y_k \cdot p = K \pm g,$$

откуда

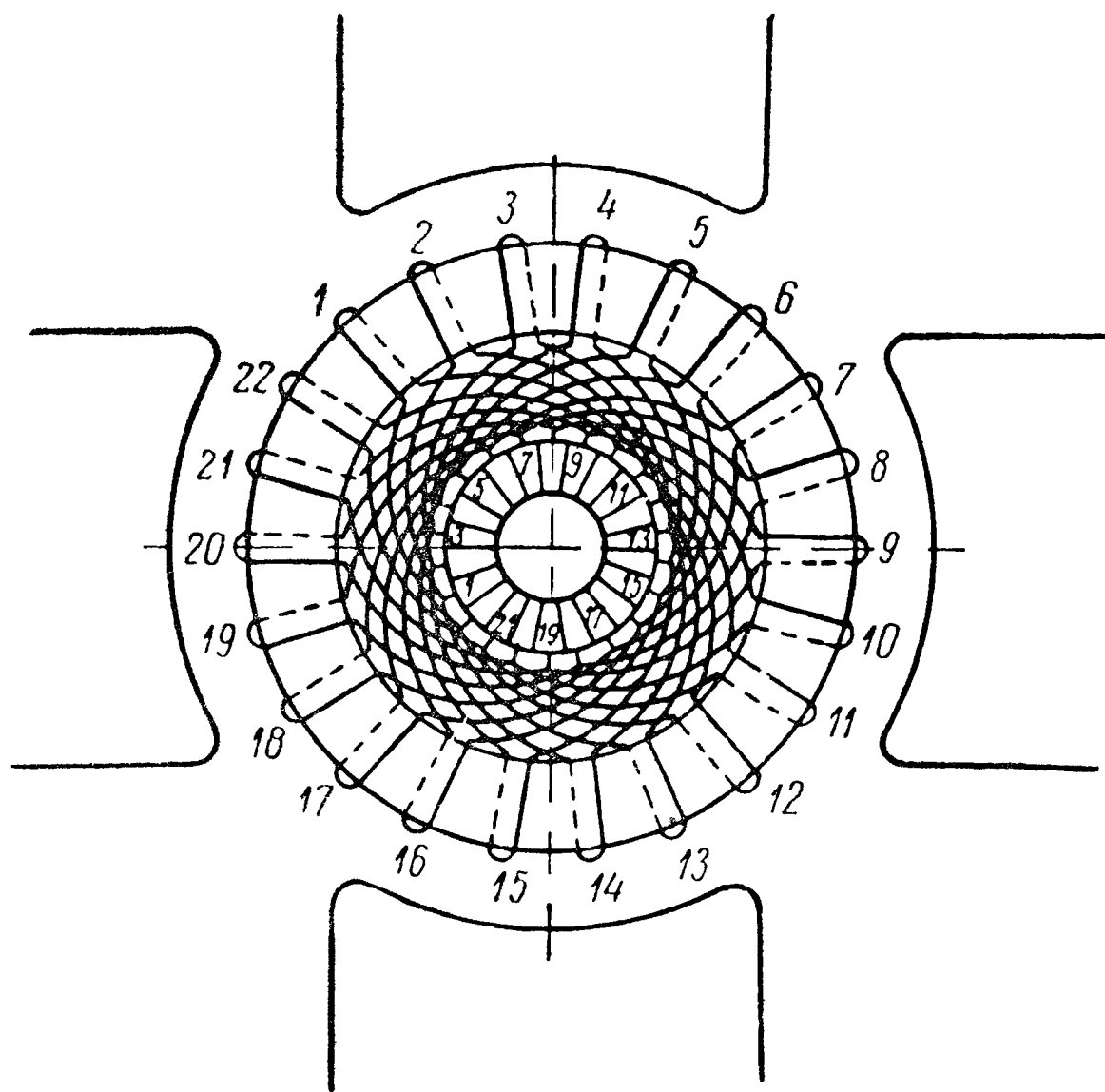
$$y_k = \frac{K \pm g}{p},$$

или в силу равенства (186):

$$y = \frac{K \pm a}{p} \quad (187)$$

Характерными особенностями рассматриваемой обмотки, кроме (186), является наличие для  $K$ ,  $a$  и  $y_k$  общего делителя  $a = g$ . Пример такой обмотки приведен на фиг 116

б) **Однократная множественная последовательная обмотка кольцевого якоря**. Изменив число активных проводников на якоре и, следовательно, число коллекторных пластин, мы сможем получить обмотку, у которой не будет общего делителя у чисел  $K$ ,  $a$  и  $y_k$ , отличного от единицы. Тогда обмотка будет замыкаться только после того, как мы захватим все проводники. Получим однократно-замкнутую последовательную обмотку или **однократную множественную последовательную обмотку**. Ее характерными особенностями является указанное только что отсутствие общего делителя, кроме единицы, у чисел  $K$ ,  $a$  и  $y_k$ . Пример такой обмотки см. на фиг. 117.



Фиг. 116. Многократная множественная последовательная обмотка.

в) Многократно-однократная множественная последовательная обмотка кольцевого якоря. Накладывая на якорь  $g$  однократных множественных последовательных обмоток кольцевого якоря с  $a'$  парами параллельных ветвей, получим множественную последовательную обмотку кольцевого якоря, в которой  $K$ ,  $a$  и  $y_k$  будут иметь общий делитель  $g < a$

Такую обмотку будем называть многократно-однократно-множественной последовательной обмоткой.

г) Резюме. Резюмируя, можем сказать, что множественная последовательная обмотка кольцевого якоря может быть следующих трех видов:

1) многократная:

$$a > 1; \quad \frac{K}{a} = \text{ц. ч.}; \quad g = a;$$

2) однократная:

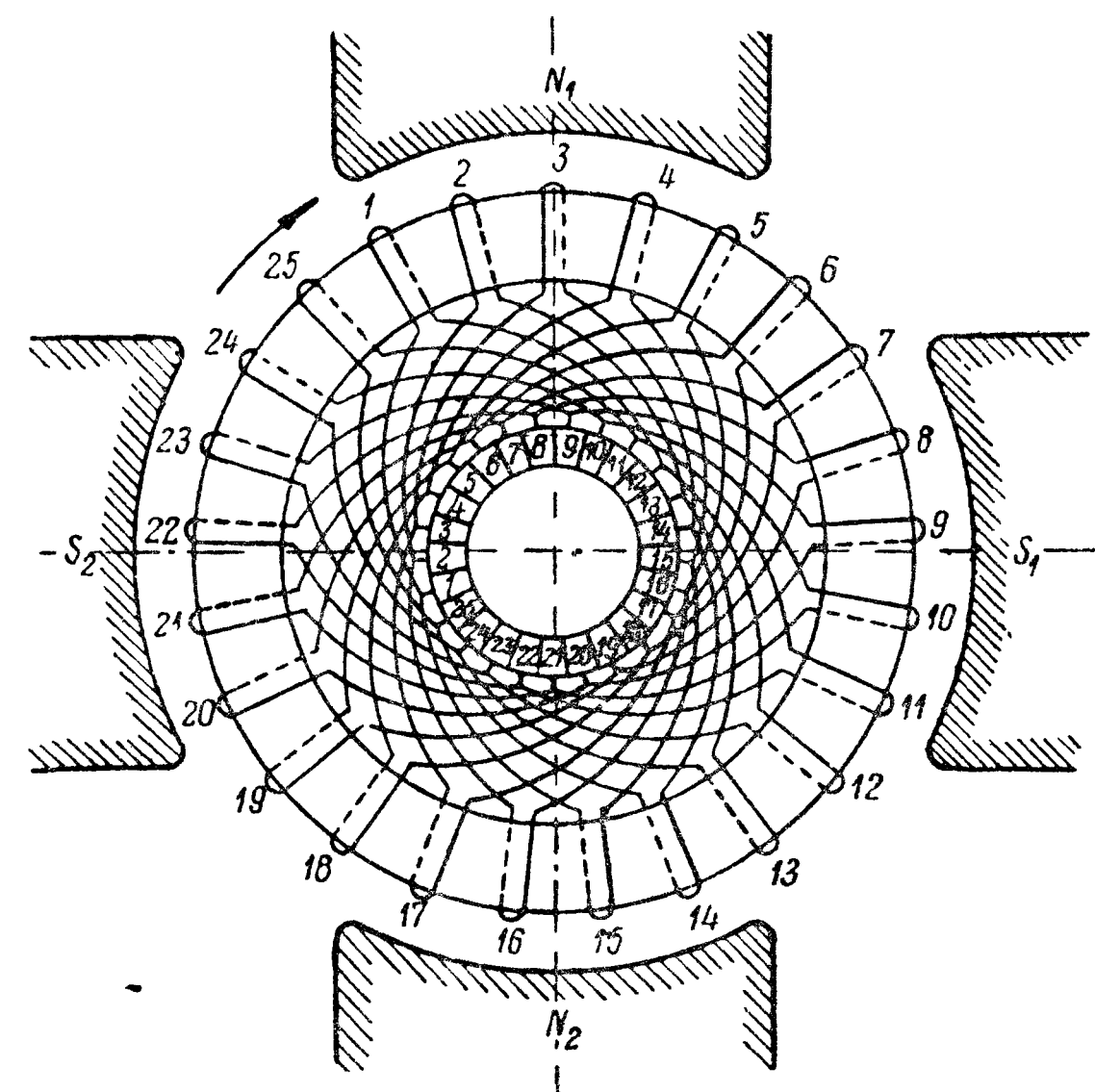
$$a > 1; \quad \frac{K}{a} \neq \text{ц. ч.}; \quad g = 1;$$

3) многократно-однократная:

$$a > 1; \quad \frac{K}{a} = g, \quad 1 < g < a.$$

д) Скачкообразные множественные последовательные обмотки кольцевого якоря.

К выводу, только что сформу-



Фиг. 117 Однократная множественная последовательная обмотка

лированному в п. «г», мы пришли, рассматривая регулярные последовательные обмотки. Однако из сказанного о скачкообразных последовательных обмотках явствует, что к такому же результату мы пришли бы, если бы исходили из скачкообразной последовательной обмотки, поэтому на этом вопросе можем не останавливаться.

## 79. Условия симметрии множественных последовательных обмоток кольцевого якоря

Простая последовательная обмотка на кольцевом якоре многополюсной машины равнозначна простой параллельной обмотке двухполюсной машины. Поэтому такая обмотка практически симметрична.

Множественная последовательная обмотка кольцевого якоря многополюсной машины имеет  $a$  пар параллельных ветвей, которые будут эквивалентны друг другу, т. е. обмотка будет симметричной, если они расположены по отношению к  $2p$  полюсам совершенно тождественно. Для этого необходимо, очевидно, чтобы  $\frac{2p}{a} = \text{целому числу}$ , т. е. приходим к такому же условию, как и в случае множественной параллельной обмотки кольцевого якоря.

Такая обмотка нуждается для своей успешной работы в осуществлении соединений равнопотенциальных точек всех простых обмоток, эти уравнивательные соединения мы будем называть уравнительными соединениями II (второго) рода, как и в случае множественной параллельной обмотки. Это будет пояснено применительно к множественной последовательной обмотке барабанного якоря (§ 103).



## 80. Комбинированные множественные обмотки кольцевого якоря и их разновидности

**а) Постановка задачи.** Выше мы видели, как, используя простые параллельные якорные обмотки кольцевого якоря и, соответственно, простые последовательные якорные обмотки кольцевого якоря, можно получить множественные параллельные и, соответственно, множественные последовательные якорные обмотки кольцевого якоря, отличающиеся от исходных якорных обмоток увеличенным числом параллельных ветвей обмотки, в чем и заключается их назначение

Возникает вопрос, нельзя ли получить множественную обмотку путем одновременного использования параллельной и последовательной обмотки кольцевого якоря? Принципиально такая обмотка, если исходить из наложения на якорь независимых обмоток, возможна при соблюдении определенных нижеуказываемых условий

Так как простые параллельные обмотки кольцевого якоря имеют  $a = p$ , то накладываемая на тот же якорь последовательная обмотка должна также иметь  $a = p$ , т. е. должна быть множественной последовательной обмоткой с коэффициентом множественности  $m = p$ . Далее, чтобы между одноименными параллельными ветвями обмотки, т. е. между всеми ее северными, а также, соответственно, между всеми ее южными параллельными ветвями внешний ток машины распределялся поровну, нужно, чтобы эти ветви состояли из одинакового числа последовательно соединенных одинаковых секций, т. е. нужно, чтобы обе совмещаемые на якоре обмотки имели одно и то же число секций  $s = K$ , т. е. одинаковое число коллекторных пластин и одинаковое число активных проводников  $s$

Наконец, если используемая простая параллельная обмотка правая, т. е. имеет при правом вращении по правую сторону каждого из северных магнитных полюсов положительную щетку, а по левую сторону — отрицательную щетку, то эти же условия должны соблюдаться и для накладываемой на якорь множественной последовательной обмотки кольцевого якоря, а это будет выполняться только в том случае, если множественная последовательная обмотка кольцевого якоря будет левой

Очевидно справедливо и обратное положение, т. е. если исходная простая параллельная обмотка левая, то множественная последовательная должна быть правой. Обобщая, можем сказать, что накладываемые на якорь параллельная и последовательная обмотки должны быть взаимно обратных направлений.

Далее, простая параллельная обмотка нуждается для успешной работы в уравнительных соединениях первого рода, число групп которых для мощных машин должно равняться полному возможному числу их; так как применение множественной обмотки имеет смысл только в крупных машинах постоянного тока, то выполнение этого условия необходимо.

С другой стороны, для успешной работы множественная последовательная обмотка тоже нуждается в уравнительных соединениях второго рода. Таким образом, обе обмотки должны быть снабжены уравнительными соединениями.

Указанные обстоятельства, усложняющие изготовление такой обмотки, а также невозможность усмотреть в ней каких-либо преимуществ перед двойственной множественной параллельной обмоткой ( $m = 2$ ), явились причиной того, что на практике такая обмотка не нашла себе применения.

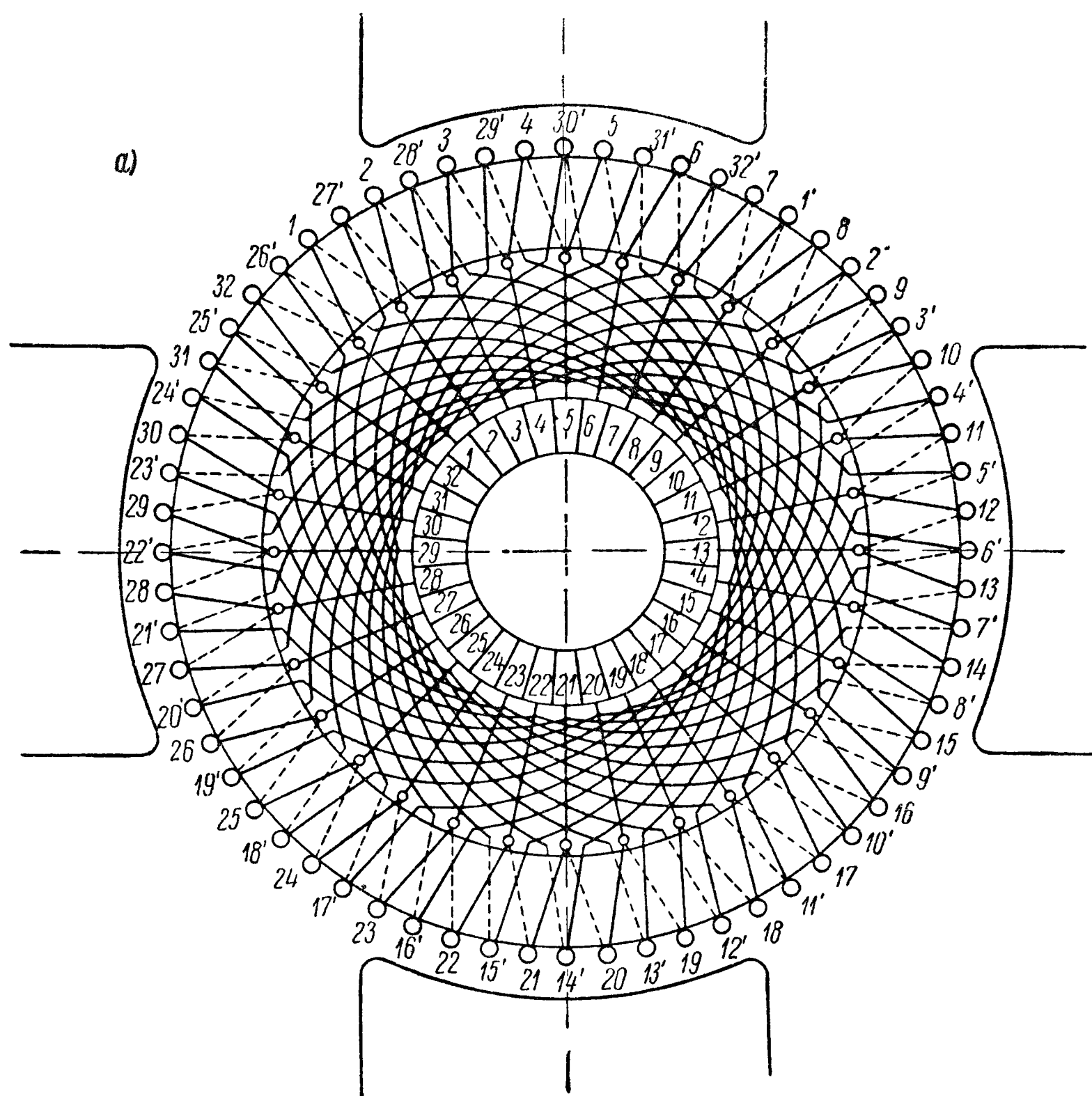
Однако, если сделать видоизменение этой обмотки, а именно. обе независимые обмотки присоединить к одним и тем же коллекторным пластинам, то получается обмотка, обладающая ценными свойствами. Во-первых, число коллекторных пластин машины уменьшается вдвое, во-вторых, как простая параллельная обмотка, так и множественная последовательная обмотка, входящие в рассматриваемую комбинированную множественную обмотку, могут

быть выполнены без уравнительных соединений, так как роль их для каждой из них будет выполнять другая обмотка (что будет показано дальше)

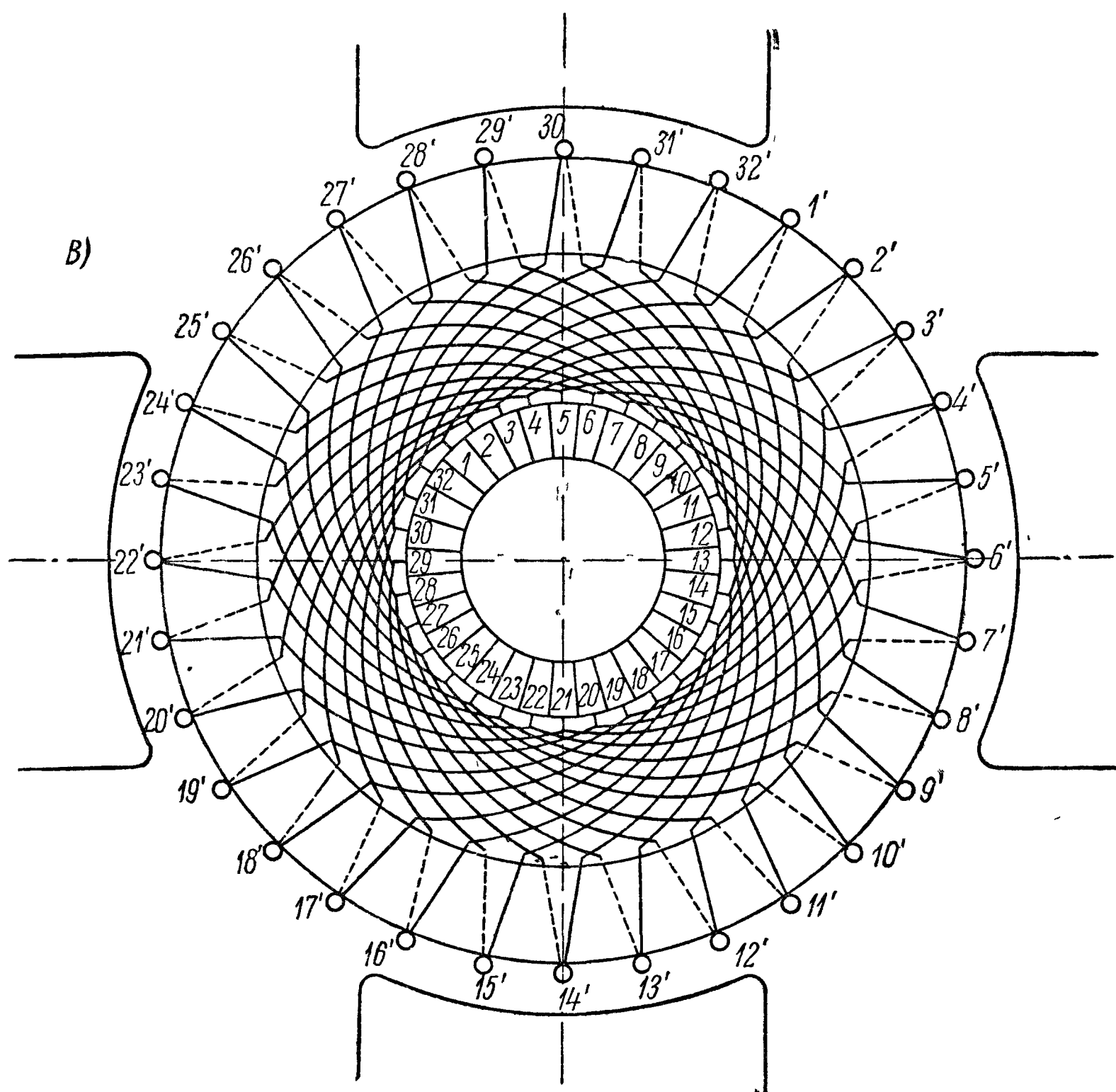
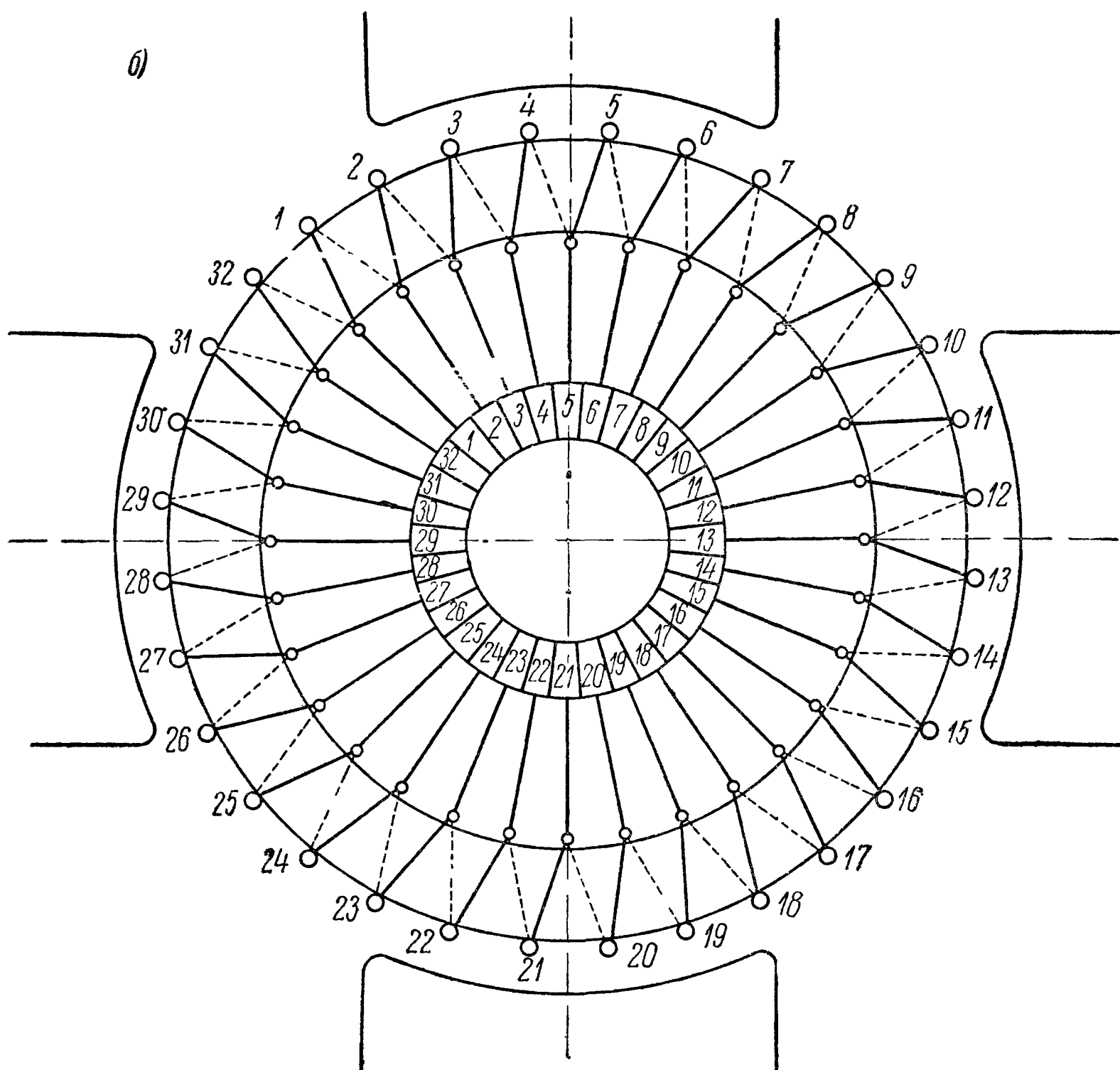
Исходная параллельная обмотка кольцевого якоря, для которой мы подбирали множественную последовательную обмотку, была простой, и общее число параллельных ветвей нашей комбинированной обмотки получилось в два раза больше, чем в исходной. Если в качестве исходной параллельной обмотки взять двойственную множественную параллельную обмотку (коэффициент множественности  $m = 2$ ;  $a = mp = 2p$ ), то такое же число параллельных ветвей должна иметь и накладываемая на якорь множественная последовательная обмотка, т. е. число пар параллельных ветвей ее тоже должно равняться  $a = 2p$ . Иными словами, для комбинированной обмотки вновь получим число параллельных ветвей, равное удвоенному числу параллельных ветвей исходной двойственной параллельной обмотки кольцевого якоря.

**б) Простая комбинированная множественная обмотка кольцевого якоря.**

Рассматриваемый тип якорной обмотки кольцевого якоря, состоящей из исходной простой параллельной обмотки и подбираемой к ней множественной последовательной обмотки, можно назвать множественной параллельно последовательной обмоткой кольцевого якоря. При этом простейшей такой обмоткой, имеющей минимальное возможное число параллельных ветвей будет обмотка, исходная параллельная обмотка которой является простой параллельной обмоткой. Мы будем называть ее **простой комбинированной множественной обмоткой** кольцевого якоря. Якорные обмотки, для которых в качестве исходной параллельной обмотки взята множественная параллельная обмотка, будем называть **сложными комбинированными множественными обмотками** кольцевого якоря.



Фиг. 118. Комбинированная множественная обмотка



венная обмотка] кольцевого якоря.

11 В. А. Толвинский

Пример простой комбинированной множественной обмотки кольцевого якоря приведен на фиг. 118, а; исходная для нее простая параллельная якорная обмотка дана на фиг. 118, б, а подобранная к ней множественная последовательная якорная обмотка — на фиг. 118, в.

Величины, относящиеся к обеим составляющим, не зависящим друг от друга якорным обмоткам, будем обозначать теми же символами, что и раньше, без индексов, а величины, относящиеся к исходной простой параллельной обмотке, теми же символами с индексом  $p$ , а относящиеся к множественной последовательной обмотке — теми же символами с индексами  $s$ .

На всех трех фиг. 118, а, б, в имеется одинаковое число полюсов  $2p = 4$ ,  $p = 2$ . Составляющие обмотки имеют (фиг. 118, а и 118, б) одинаковое число секций, равное числу коллекторных пластин:  $S = K = 32$ . Секции приняты одновитковыми,  $w_s = 1$ , что естественно, поскольку комбинированная обмотка может иметь смысл лишь применительно к мощным машинам постоянного тока для которых всегда, по коммутационным соображениям, берется  $w_s = 1$ .

Для простой параллельной обмотки шаг по коллектору  $y_{kp} = +1$ , взята правая обмотка (фиг. 118, б), поэтому множественная последовательная обмотка должна быть левой (фиг. 118, в). Для нее шаг по коллектору

$$y_{ks} = \frac{K-a}{p} = \frac{32-2}{2} = 15.$$

## Г. СПОСОБЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЗАМКНУТЫХ ОБМОТОК КОЛЬЦЕВОГО ЯКОРЯ В ОБМОТКИ БАРАБАННОГО И ДИСКОВОГО ЯКОРЕЙ

### 81. О способе преобразования кольцевых якорных обмоток в барабанные якорные обмотки

Уяснение барабанных замкнутых якорных обмоток достигается весьма просто, если принять во внимание, что на барабанном якоре можно осуществить все те типы замкнутых якорных обмоток, которые мы рассмотрели применительно к кольцевому якору, и что барабанные обмотки можно мыслить себе как результат преобразования кольцевых обмоток с соблюдением следующего способа преобразования.

Способ состоит в том, что, не нарушая у кольцевого якоря соединений активных проводников друг с другом и их присоединений к коллекторным пластинам, мы выносим внутренние мертвые проводники кольцевой якорной обмотки на наружную поверхность якоря и укладываем их таким образом, чтобы э. д. с., которые будут теперь индуцироваться в них, не противодействовали э. д. с., которые индуцируются в активных проводниках исходной кольцевой якорной обмотки.

Так как каждый мертвый проводник соединяет задний торец одноименного (имеющего тот же номер) активного проводника с передним торцом (началом) другого активного проводника, лежащего в поле той же полярности, то очевидно, что мертвый проводник придется при вынесении на наружную поверхность якоря поместить под полюсом противоположной полярности. При таком вынесении мертвых проводников они становятся активными, т. е. принимают участие в создании э. д. с. якоря, их мы будем называть дополнительными активными проводниками барабанной обмотки, в отличие от активных проводников, бывших на поверхности кольцевого якоря, которые будем называть основными активными проводниками барабанной обмотки.

Указанный способ вынесения наружу мертвых проводников кольцевой обмотки может быть осуществлен двояко: можно выносимый мертвый проводник положить под полюсом противоположной полярности, находящимся справа от исходного полюса, — правый вынос, или находящимся слева от исходного полюса, — левый вынос. Первоначально мы будем осуществлять правый вынос и будем укладывать выносимые наружу внутренние, мертвые



проводники, по возможности, на расстоянии полюсного деления, предполагая сначала, что наружная поверхность якоря гладкая (не имеет зубцов и впадин), — гладкий барабанный якорь. Если на расстоянии полюсного деления место на наружной поверхности якоря занято основным активным проводником, то дополнительный активный проводник придется уложить на расстоянии, несколько меньшем, чем полюсное деление.

При вынесении точно на полюсное деление получающаяся барабанная обмотка называется *диаметральной барабанной обмоткой*, так как вынесенный проводник в случае двухполюсной машины располагается по диаметру якоря от исходного активного проводника: иногда пользуются термином *обмотка с полным шагом*. Во втором случае (при выносе на расстояние меньше  $\tau$ ) обмотку называют *хордовой обмоткой*, или *обмоткой с укороченным шагом*.

В диаметральной барабанной якорной обмотке э. д. с. якоря получает двойное значение по сравнению с э. д. с. исходной кольцевой якорной обмотки, для хордовой барабанной обмотки она несколько меньше двойного значения. В указанном увеличении э. д. с. якоря заключается первое преимущество барабанного якоря перед кольцевым. Выигрыш в затрате меди на обмотку якоря получается, однако, менее значительным, так как в барабанной якорной обмотке торцевые лобовые соединения имеют большую длину, чем в кольцевом якоре, что будет ясно из дальнейшего.

Вторым преимуществом барабанной якорной обмотки является освобождение внутренней полый части якоря от проводников, что улучшает охлаждение проводников и позволяет втулку якоря делать не из дорогой бронзы, а из ферромагнитного материала, чугуна или стали, а при малых диаметрах якоря совсем не делать втулки, насаживая сердечник якоря непосредственно на вал машины.

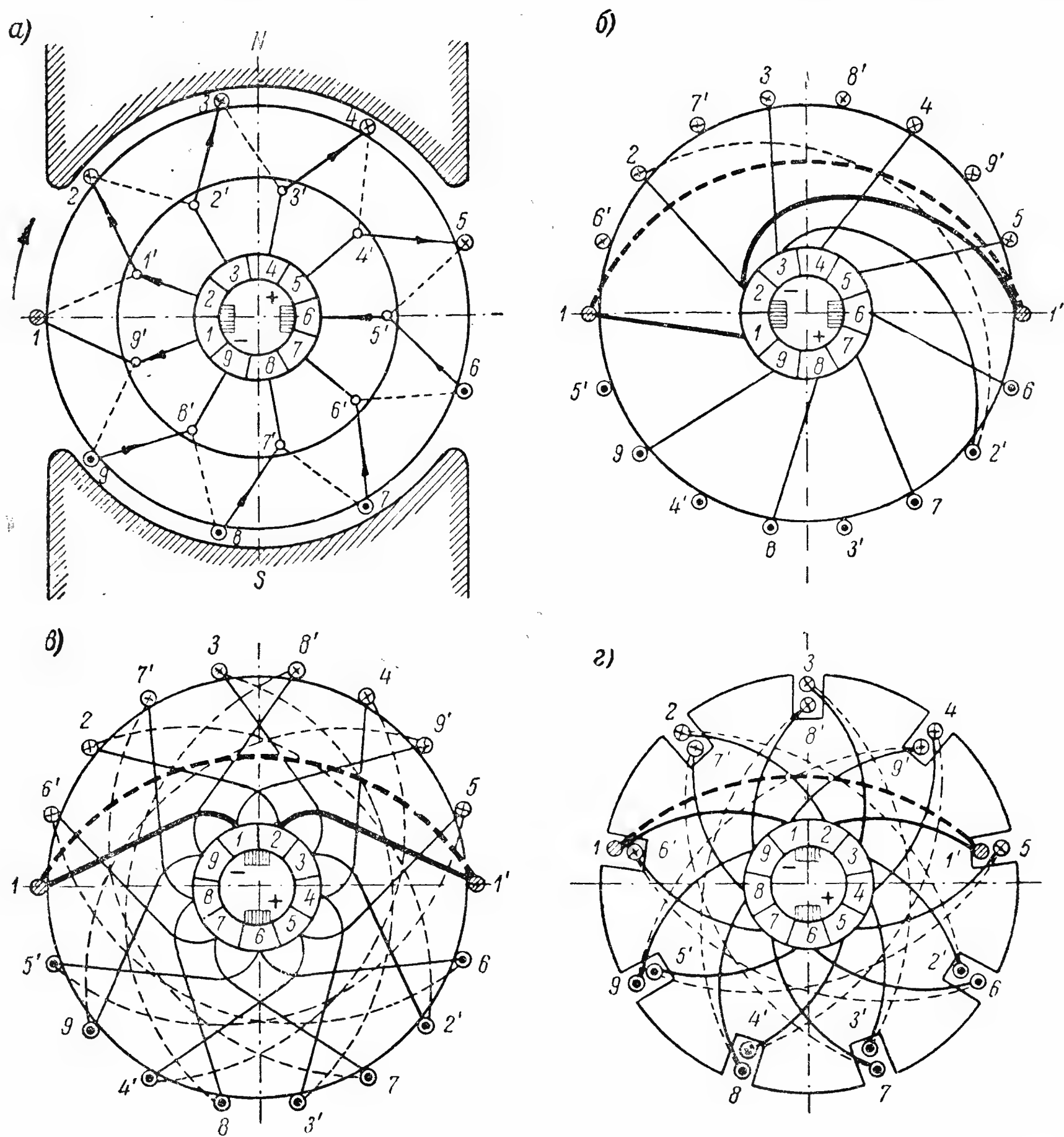
Третьим, особо существенным преимуществом барабанной якорной обмотки является возможность выполнения ее из изготавливаемых на стороне шаблонных якорных катушек и укладки их в пазы якоря при зубчатом строении наружной поверхности якоря; это удешевляет и стоимость машины и делает ее конструкцию более надежной. При зубчатом строении якоря, т. е. при укладке обмотки в пазы якоря, получается возможность уменьшить зазор машины и этим уменьшить необходимое число намагничивающих ампервитков обмотки возбуждения.

При преобразовании обмоток кольцевого якоря в барабанные обмотки зубчатого якоря выносимый на наружную поверхность мертвый проводник кольцевой обмотки нужно укладывать под основной активный проводник, лежащий на расстоянии, равном полюсному делению  $\tau$ , или под ближайший к этому расстоянию, т. е. находящийся на расстоянии, несколько меньшем, чем полюсное деление  $\tau$ .

## 82. Преобразование параллельных обмоток кольцевого якоря в обмотки гладкого барабанного якоря

На фиг. 119, в представлена барабанная обмотка, полученная из правой простой параллельной обмотки двухполюсного кольцевого якоря с нечетным числом активных проводников, изображенной на фиг. 119, а. Применение способа вынесения наружу мертвых проводников кольцевой якорной обмотки иллюстрировано на фиг. 119, б для правого выноса. На фиг. 119, в основные активные проводники несут прежнюю нумерацию, дополнительные активные проводники — нумерацию мертвых проводников кольцевого якоря, т. е. обозначены цифрами со штрихом. Вследствие нечетного числа основных проводников выносимые наружу мертвые проводники оказалось возможным уложить на расстоянии  $\tau$  от основных проводников с теми же номерами. Соединения, идущие к одной и той же коллекторной пластине, например 2-й, получились

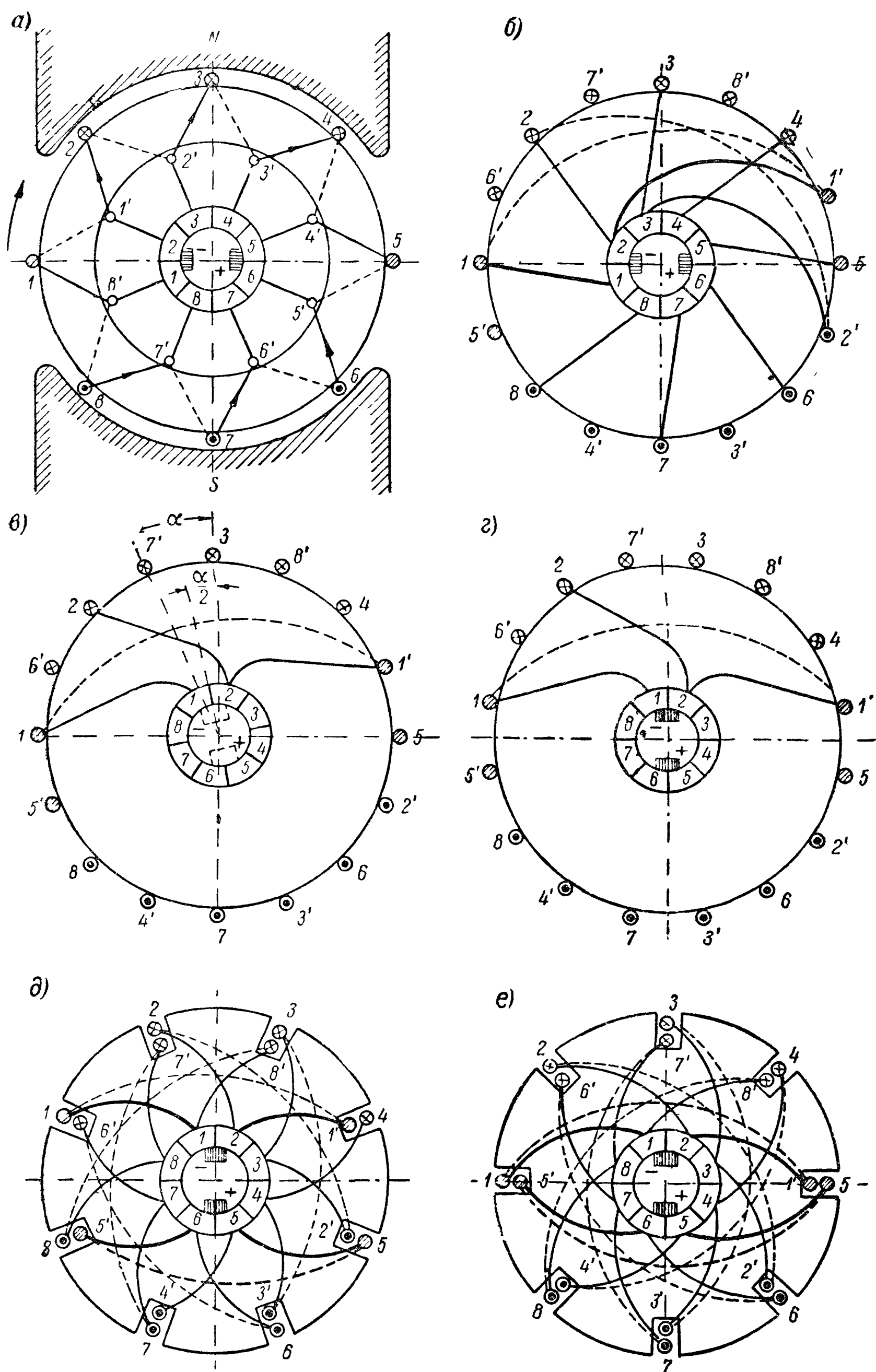
на фиг. 119, б разной длины и формы: одно, связывающее пластину с торцом проводника № 2, — прямое, другое, идущее от торца проводника № 1' изогнуто дугой. Можно сделать оба этих соединения одинаковыми, если при закреплении коллектора на валу машины повернуть его относительно положения на фиг. 119, а на  $+90^\circ$ , как показано на фиг. 119, в. Одновременно на тот же угол придется повернуть и щетки, чтобы они коммутировали (замыкали



Фиг. 119. Преобразование параллельной обмотки кольцевого якоря в параллельную обмотку барабанного якоря при нечетном числе активных проводников.

накоротко) секции якорной обмотки, как и раньше, при прохождении ~~их~~ ~~рез~~ геометрическую магнитную нейтраль. Вследствие этого щетки окажутся стоящими по оси полюсов. Таким образом, в то время как в машине с ~~кольцевым~~ ~~якорем~~ (фиг. 111) линия расположения щеток совпадает с геометрической магнитной нейтралью,<sup>1</sup> в машине с барабанным якорем и симметричными единительными лобовыми частями эта линия при правом выносе ~~механизма~~ ~~проводников~~ совпадает с осью полюсов, причем под северным (положительным) полюсом получаем отрицательную щетку.

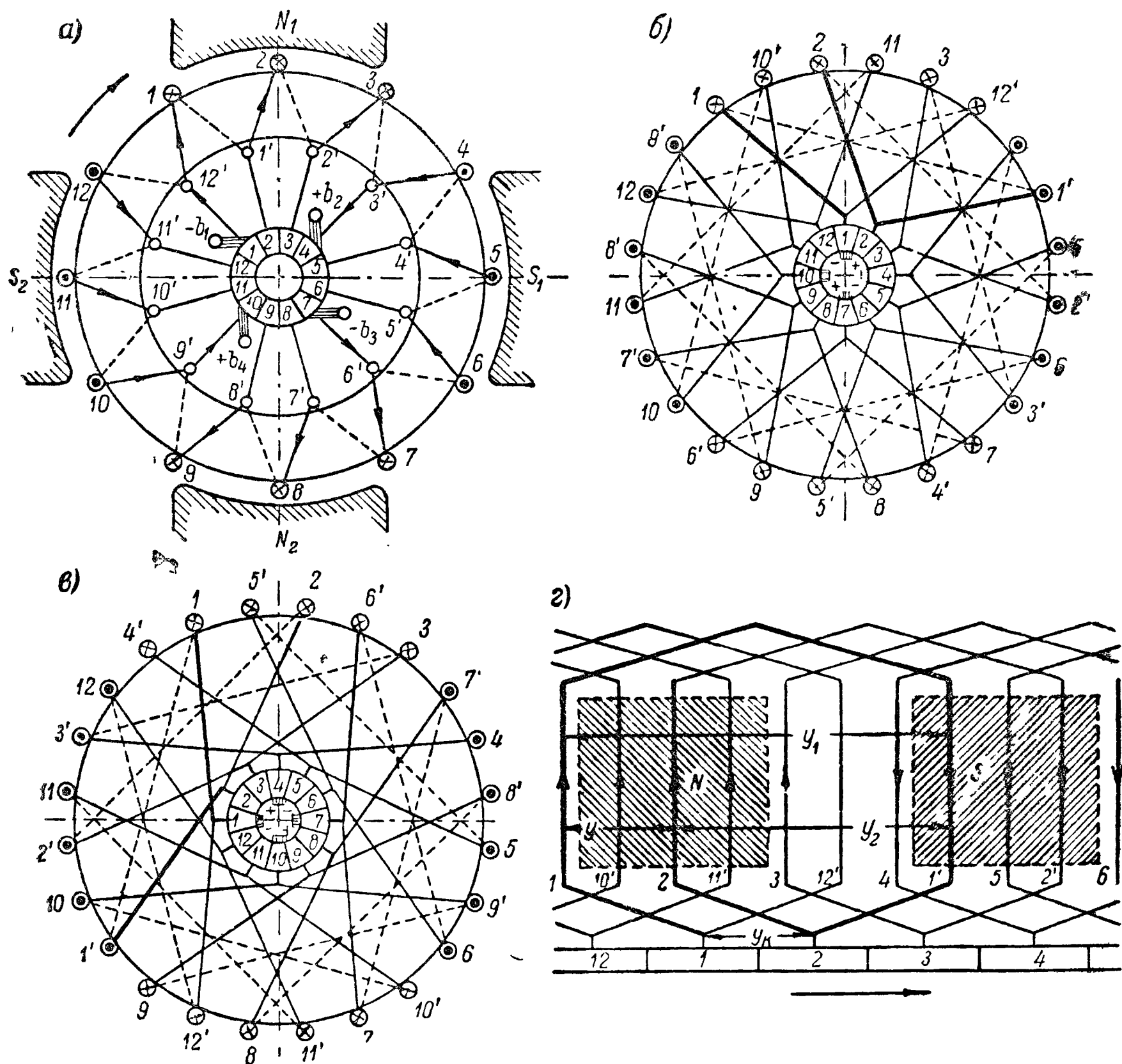
<sup>1</sup> В данной главе имеется в виду генератор, вращающийся вхолостую. В ~~дальнейшем~~ ~~укажем~~ увидим, что в генераторе, не имеющем добавочных полюсов, щетки обычно ~~стоят~~ ~~несколько~~ ~~сдвинутыми~~ по направлению вращения генератора, в генераторе с ~~добавочными~~ ~~полюсами~~ щетки, как правило, стоят на магнитной нейтрали.



Фиг. 120 Преобразование параллельной обмотки кольцевого якоря в параллельную обмотку барабанного якоря при четном числе проводников

На фиг. 120 показан способ образования барабанной якорной обмотки из правой простой параллельной обмотки кольцевого якоря двухполюсной машины фиг. 120, а, имеющей четное число активных проводников. Как видим, выносимые мертвые проводники пришлось укладывать на расстоянии меньше  $\tau$ , так как по диаметру, т. е. на расстоянии  $\tau$ , места заняты активными

проводниками. Стремясь сделать передние лобовые соединительные части секций равной длины и формы, получаем фиг. 120, в. При этом линия щеток образует с осью полюсов угол  $\alpha/2$ . Чтобы в момент коммутации проводники коммутируемых секций (например № 1 и 1') находились в одинаковых магнитных полях, нужно щетки повернуть еще на угол  $\alpha/2$ , т. е. поставить их, как и на фиг. 120, в, по оси полюсов (фиг. 120, г).



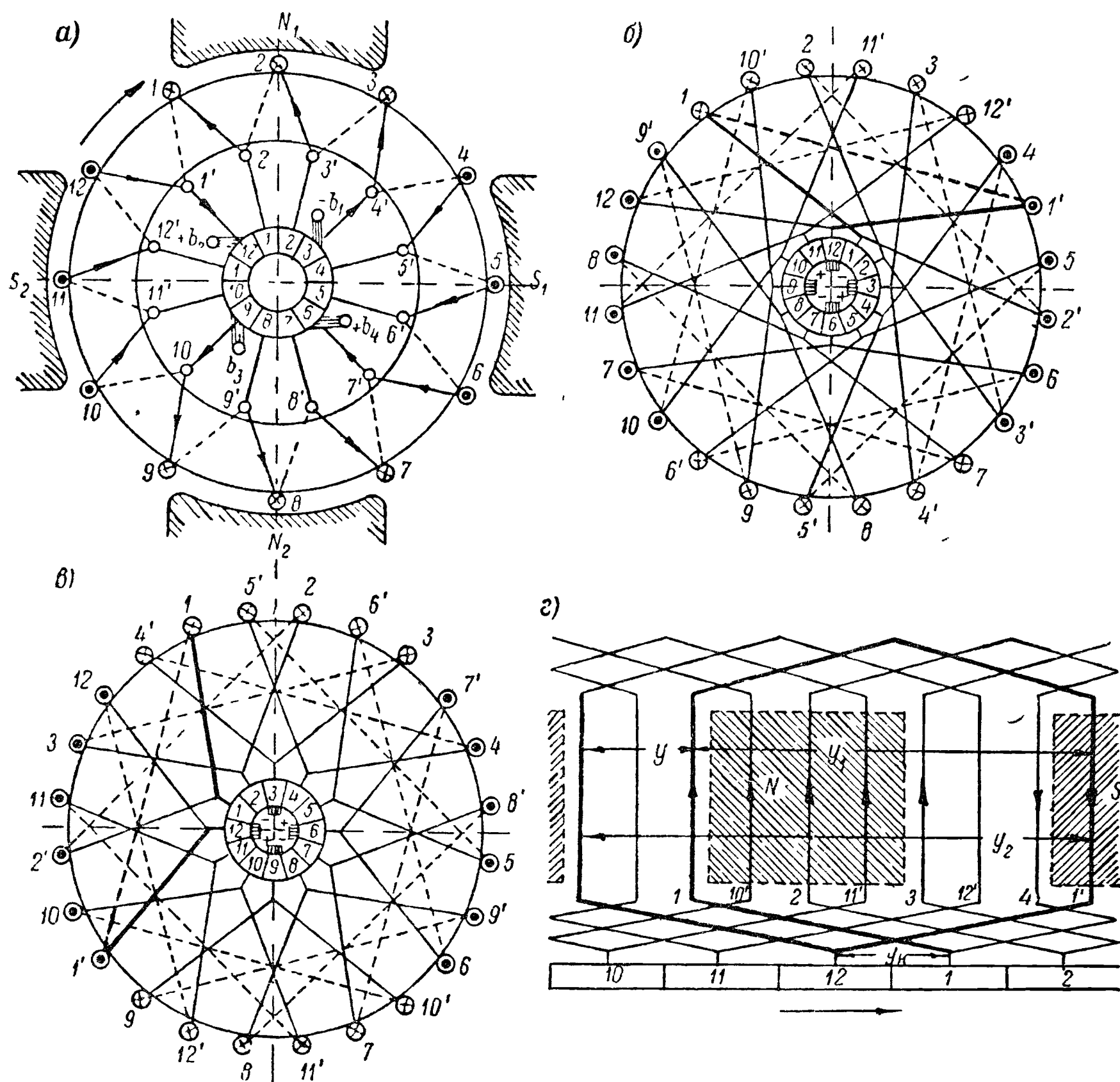
Фиг. 121 Сопоставление правого и левого выноса мертвых проводников при преобразовании обмотки.

Мы применяли на фиг. 119 и 120 правый вынос мертвых проводников. Сопоставление правого и левого выноса сделано на фиг. 121 для четырехполюсной кольцевой машины с правой простой параллельной обмоткой. Как видим, при правом выносе щетки пришлось сдвинуть на  $+90$  эл. градусов, а при левом выносе на  $-90$  эл. градусов, поэтому можем сказать, что в барабанном якоре с правой простой параллельной обмоткой, полученной при правом выносе, под северными полюсами стоят отрицательные щетки, а при левом выносе — положительные щетки. Кроме того, при левом выносе для правой простой параллельной обмотки получаем перекрещивание соединительных частей обмотки при подходе их к коллектору, при правом выносе в правой параллельной обмотке таких перекрещиваний нет. Обмотку на фиг. 121, б будем называть правой простой параллельной обмоткой барабанного якоря с правыми петлями, а обмотку на фиг. 121, в — с левыми петлями.

На фиг. 122 сделано преобразование левой простой параллельной обмотки четырехполюсной кольцевой машины в барабанную обмотку, а именно: на фиг. 122, б при применении правого выноса, а на фиг. 122, в — левого выноса мертвых проводников. Соответственно, получаем: на фиг. 122, б —



левую простую параллельную обмотку барабанного якоря с правыми петлями, а на фиг. 122, в — с левыми петлями. Как видим, в левой простой параллельной обмотке правые петли (правый вынос) дают перекрещивание лобовых частей у коллектора, левые петли (левый вынос) перекрещиваний не дают. Суммируя, можем сказать, что в тех случаях, когда направление выноса совпадает с направлением обмотки, перекрещиваний нет, когда эти направления взаимно обратны — перекрещивание имеется.



Фиг. 122. Преобразование левой простой параллельной обмотки четырех-полюсной машины в барабанную обмотку.

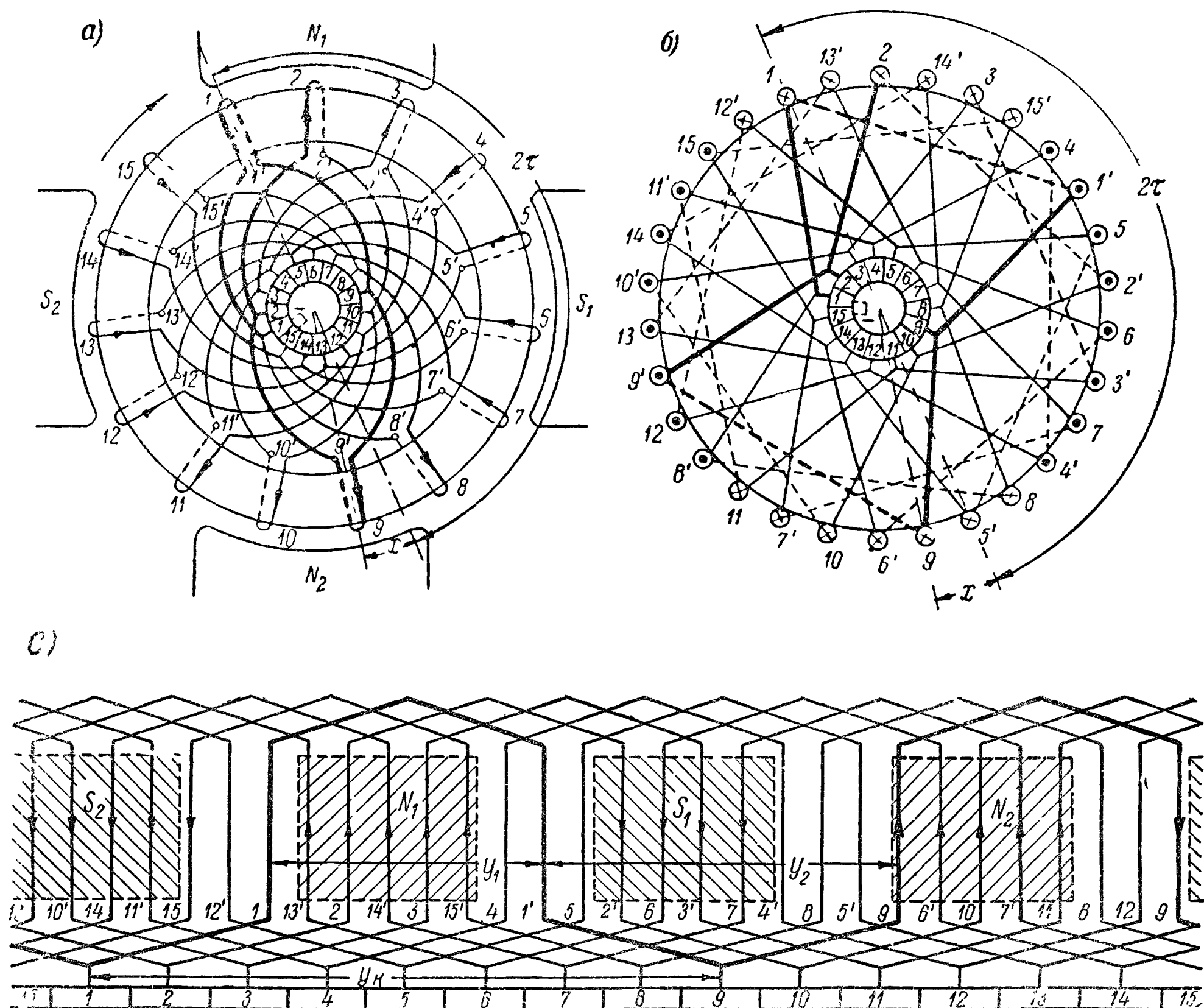
Полярности щеток на фиг. 121, в и 122, в соответственно обратны тем, какие имеются на фиг. 121, б и 122, б.

Для барабанных якорных обмоток обычно пользуются не торцевыми схемами, которые мы применяли ранее для кольцевых обмоток, а схемами-развертками. Такие схемы даны на фиг. 121, г и 122, г. Они получаются, если барабанный якорь разрезать по образующей и развернуть в плоскость. Как видим, на схемах-развертках простые параллельные обмотки барабанного якоря получают характерный петлеобразный вид, поэтому их называют *петлевыми обмотками*.

Так же производится преобразование множественных параллельных обмоток кольцевого якоря в множественные параллельные обмотки барабанного якоря.

### 83. Преобразование последовательных обмоток кольцевого якоря в обмотки гладкого барабанного якоря

На фиг. 123 показано преобразование в обмотку гладкого барабанного якоря регулярной правой простой последовательной обмотки с правым обходом, осуществленной на четырехполюсной кольцевой машине. На фиг. 124 сделано такое же преобразование регулярной левой простой последовательной обмотки с правым обходом, причем на фиг. 123, в и 124, в даны соответствующие

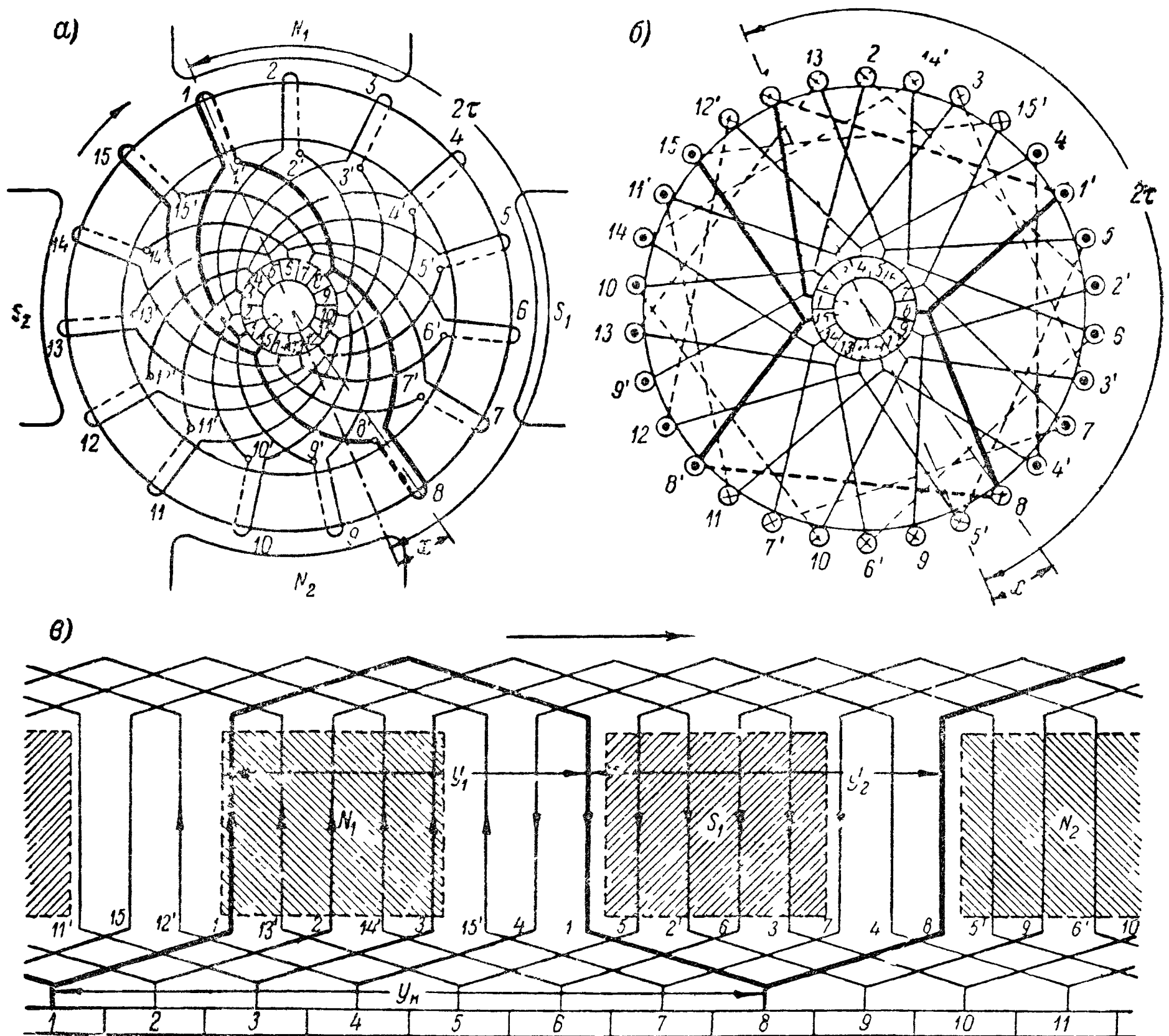


Фиг. 123. Преобразование правой простой последовательной обмотки

щие схемы-развертки. В обоих случаях преобразования сделаны с правым выносом. На схемах-развертках (фиг. 123, в и 124, в) обмотка получает характерный волнообразный вид и называется **волновой обмоткой**. Такой вид простой последовательной обмотки на барабанном якоре является следствием применения правого выноса мертвых проводников. При применении левого выноса обмотка приобретает петлеобразный вид, как показано на фиг. 125 для правой последовательной обмотки. Так как при этом лобовые соединения получаются более длинными, то на практике применяется только правый вынос.

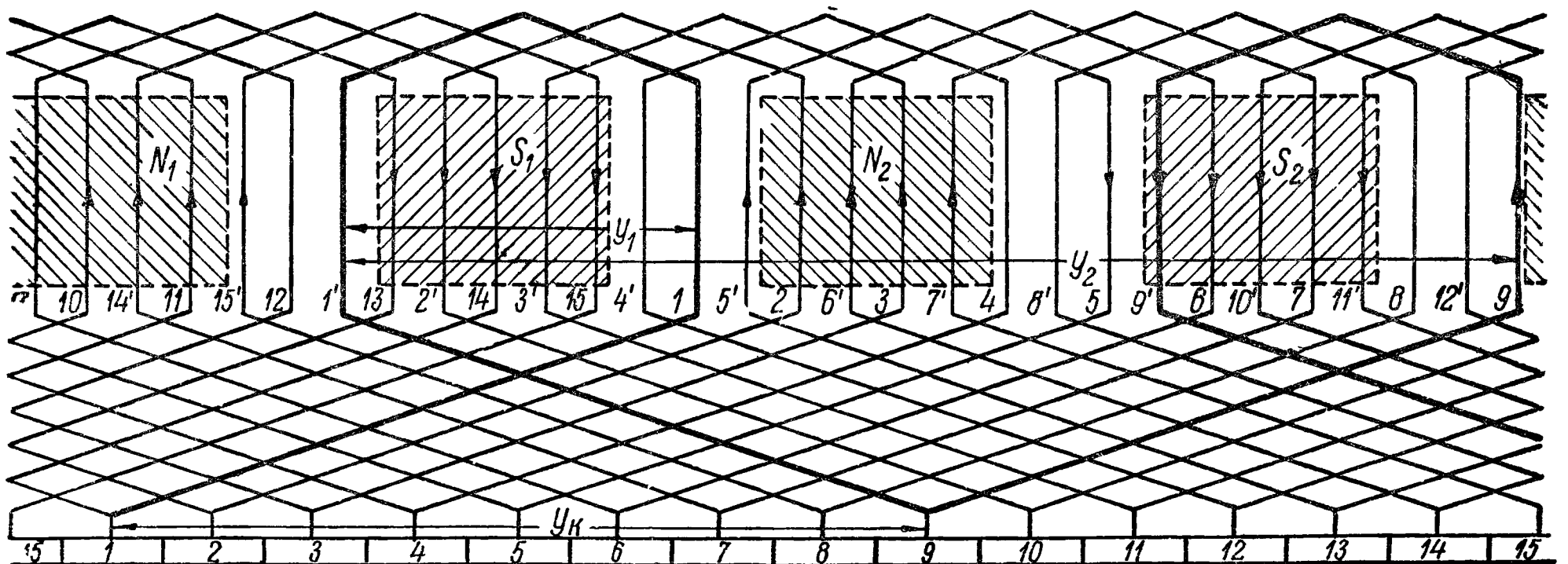
Термин «волновая обмотка» используется обычно как синоним термина «простая последовательная обмотка» барабанного якоря, хотя, по существу, это не синоним, поскольку практически возможно осуществление на барабанном якоре и петлеобразной простой последовательной обмотки.

Что касается расположения щеток на коллекторе барабанного якоря с простой последовательной обмоткой, то их приходится в обоих случаях передви-



Фиг. 124 Преобразование левой простой последовательной обмотки.

гать вправо на  $+90$  эл. градусов и ставить под полюсами, при этом нетрудно установить что при правом вращении правой простой последовательной обмотки барабанного якоря с правым обходом положительная щетка стоит



Фиг. 125. Правая простая последовательная обмотка с левым выносом.

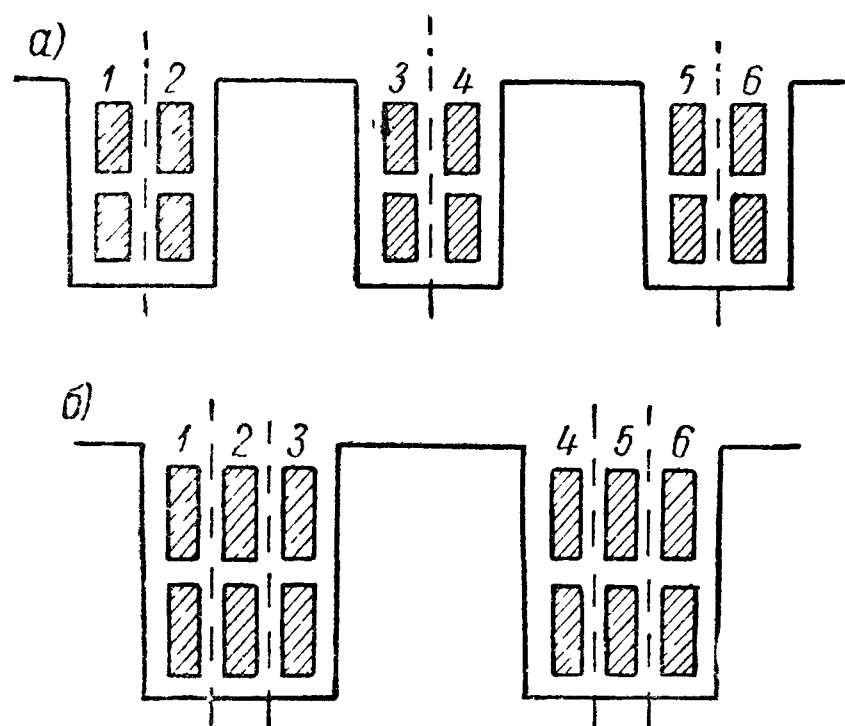
под северным полюсом, отрицательная — под южным полюсом; при правом вращении левой простой последовательной обмотки с правым обходом полярности щеток получаются обратными. Аналогичные правила можно сформулировать для простых последовательных обмоток с левым обходом.

Все сказанное легко распространяется на преобразование в барабанные обмотки гладкого якоря множественных последовательных обмоток кольцевого якоря.

#### 84. Преобразование обмоток кольцевого якоря в обмотки зубчатых барабанных якорей

До сих пор мы производили преобразование обмоток кольцевого якоря в обмотки гладкого барабанного якоря. На практике, однако, находят применение исключительно зубчатые барабанные якоря, к которым и переходим.

Способ преобразования кольцевых обмоток в обмотки зубчатых барабанных якорей был уже указан в § 81; он отличается от способа преобразования в обмотки гладких барабанных якорей лишь тем, что в зубчатых якорях мы укладываем выносимые наружу мертвые проводники, примерно, на полюсном делении помещая их под основные активные проводники. Каждую такую пару проводников, состоящую из одного основного активного проводника (верхний) и одного дополнительного активного проводника (нижний), утапливаем в паз. Получаем обмотку, имеющую столько пазов и столько зубцов, сколько кольцевая обмотка имела актив-



Фиг. 126. Объединение нескольких элементных пазов в один реальный.

ных проводников. Иллюстрация дана на фиг. 119 и 120 для простой параллельной обмотки. В случае фиг. 119, а (нечетное число основных активных проводников на пару полюсов) обмотка зубчатого барабанного якоря может быть только хордовой, в случае же фиг. 120, а (четное число основных активных проводников на пару полюсов) возможна как хордовая (фиг. 120, д), так и диаметрально-обмотка (фиг. 120, е).

В отличие от ранее рассмотренных якорных обмоток, называемых однослойными обмотками, обмотки на фиг. 119, г, 120, д и 120, е могут быть названы двухслойными обмотками. На этих фигурах каждый реальный паз состоит из одного элементного паза, где под элементным пазом понимаются два проводника, лежащих друг над другом. Объединяя (при достаточном числе основных активных проводников) два (фиг. 126, а) или несколько ( $u_s$ ) элементных пазов в один реальный, получим обмотку, реальный паз которой состоит из  $u_s$  элементных пазов. На фиг. 126, б показана барабанная обмотка, состоящая из реальных пазов, имеющих  $u_s = 3$  элементных паза. Как правило, для практических обмоток  $u_s = 2$  или  $u_s = 3$ , но бывает  $u_s = 1$  и  $u_s = 4$ , в редких случаях доходят до  $u_s = 5$ . Таким образом,  $1 \leq u_s \leq 5$ .

В настоящее время принято нумеровать не проводники зубчатых барабанных якорей, а элементные пазы (фиг. 126). Для образования обмотки зубчатого якоря, очевидно, недостаточно знания шагов  $y_s$  и  $y_k$ , которые при нумерации элементных пазов барабанного якоря равны, так же как и шаги кольцевого якоря:  $y_s = y_k$ . Необходимо еще знание так называемых *частичных шагов по якорю*.

Вводим определения частичных шагов обмотки барабанного якоря: *первый частичный шаг по якорю*, или *первый частичный секционный шаг*  $y_{s1}$ ; он показывает, как соединять активные проводники на задней стороне барабана и ведет от заднего торца первого активного проводника данной секции, лежащего вверху элементного паза, до заднего торца другого активного проводника той же секции, лежащего внизу другого элементного паза; его мы можем, очевидно, измерять тем числом про-



межутков между элементными пазами, которое мы проходим, образуя секцию обмотки.

Второй частичный шаг по якорю, или второй частичный секционный шаг  $y_{s2}$ , он показывает, как соединить активные проводники на передней стороне барабана и ведет от переднего торца второго активного проводника данной секции, лежащего внизу элементного паза, до переднего торца первого активного проводника другой секции, лежащего вверху другого элементного паза. Этот шаг мы можем также измерять тем числом промежутков между элементными пазами, которое мы проходим, осуществляя соединение секций обмотки между собой. Так, на фиг. 119, с шаг  $y_{s1} = 4$ , шаг  $y_{s2} = 3$ .

В случае простой параллельной обмотки разность частичных шагов дает результирующий секционный шаг:

$$y_s = y_{s1} - y_{s2}.$$

В случае барабанной простой параллельной обмотки  $y_s = \pm 1$ , где знак плюс соответствует правой, а знак минус — левой простой параллельной обмотке.

Все сказанное без труда распространяется на преобразование в барабанные обмотки множественных параллельных обмоток кольцевого якоря и не нуждается в дополнительных пояснениях и иллюстрациях.

В случае простой последовательной обмотки результирующий шаг  $y_s$  равен сумме частичных шагов  $y_{s1}$  и  $y_{s2}$

$$y_s = y_{s1} + y_{s2},$$

как это видно из фиг. 123 и 124.

Таким образом, в общем виде можем написать:

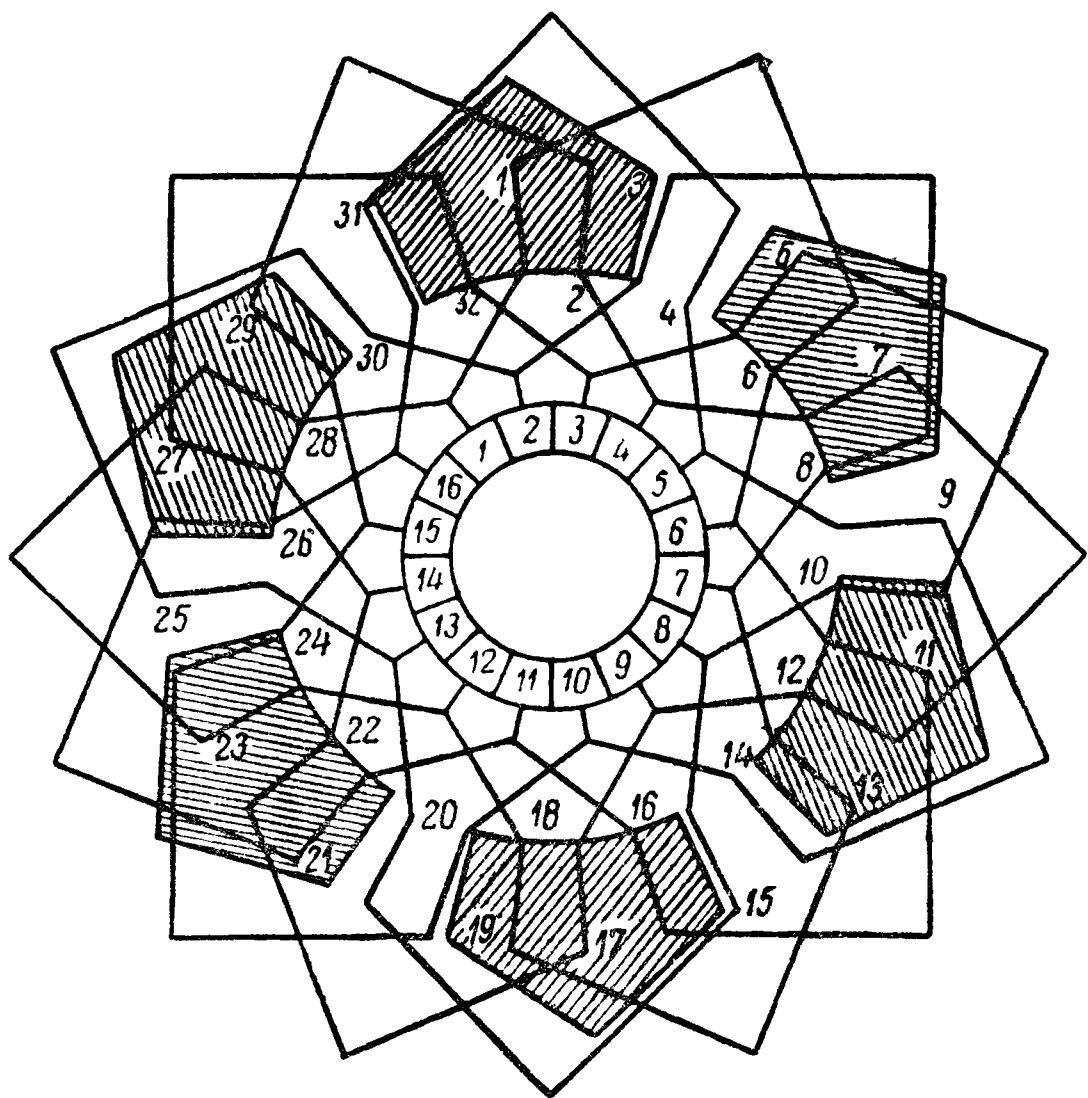
$$y_s = y_{s1} \mp y_{s2}.$$

## 85. Преобразование обмоток барабанного якоря в обмотки дискового якоря

Из вышеизложенного явствует, что любой кольцевой обмотке можно противопоставить эквивалентную ей по свойствам барабанную обмотку. Любую же из последних легко можно преобразовать в обмотку дискового якоря.

Как показывает название, тело дискового якоря представляет собой диск, который вращается вокруг оси и несет проводники, расположенные по радиусам. Полюсы размещаются обычно по сторонам диска таким образом, что проводники пересекают при своем вращении линии магнитного поля перпендикулярно.

По существу, дисковый якорь представляет собой не что иное, как развернутую в плоскость диска боковую поверхность барабанного якоря. Поэтому для дисковых якорей принципиально возможны все те типы обмоток, что и для якорей



Фиг. 127. Схема дискового якоря с последовательной обмоткой.

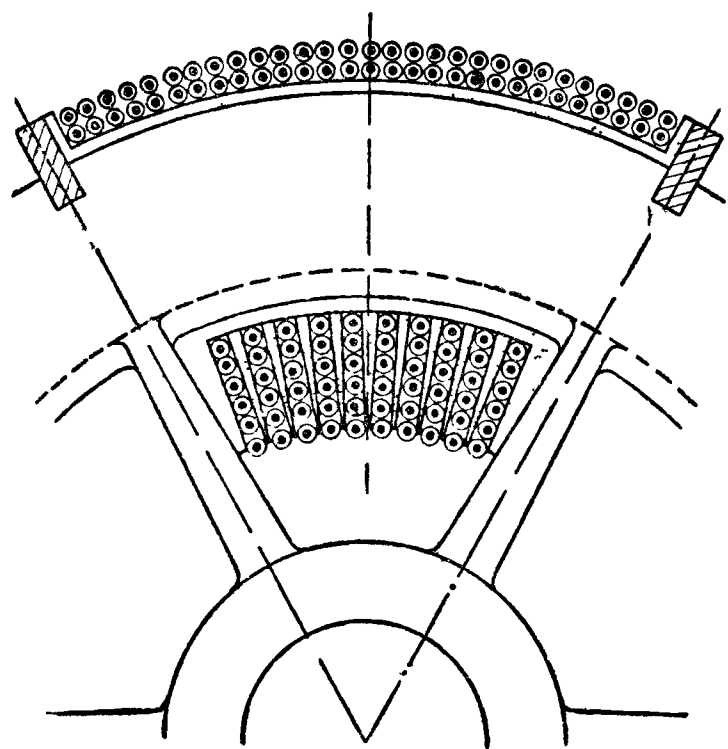
барабанных. Практически пригодной оказалась простая последовательная обмотка, так как она позволяет получить требуемую э. д. с. при наименьшем числе активных проводников.

На фиг. 127 дана схема дискового якоря с последовательной обмоткой для шестиполюсной машины. Форма полюсных поверхностей (на рисунке заштрихованы) определяется формой витков обмотки. Чтобы в соединительных частях обмотки не создавалось э. д. с., обратных индуктированным в активных проводниках, полюсным поверхностям придана форма, заостренная к внешней стороне, боковые же стороны обмотки проведены по радиусам якоря.

Практического значения дисковые якоря не имеют, так как практика показала трудность осуществления надежно работающего дискового якоря и отсутствие в нем каких-либо преимуществ перед барабанными якорями.

## 86. Недостатки кольцевых обмоток якоря

Большим недостатком кольцевого якоря является необходимость делать обмотку вручную, протягивая соединительные части активных проводников внутри кольца (фиг. 128). Вследствие этого изготовление обмотки требует много времени и обходится дорого.



Фиг. 128. Конструктивная схема кольцевого якоря

Внутренние соединительные части обмотки, как мы уже отмечали, не участвуют в создании э. д. с. машины; они повышают стоимость машины, увеличивают сопротивление обмотки и нередко влекли за собой порчу обмотки, так как охлаждение ее весьма несовершенно. Это объясняется малым внутренним диаметром якоря, вследствие чего толщина слоя обмотки внутри него значительно больше, чем снаружи якоря (фиг. 128).

Кроме того, якорная звезда кольцевого якоря стоит дорого; ее приходится делать из немагнитного материала (бронзы), чтобы не отвлекать внутрь кольца основного потока,

в противном случае во внутренних соединительных проводниках начали бы индуктироваться э. д. с., направленные навстречу э. д. с. проводников, расположенных на наружной поверхности якоря, а это повело бы к уменьшению э. д. с. машины. Все эти обстоятельства и ряд других повели к тому, что кольцевой якорь совершенно вышел из употребления и был заменен барабанным якорем.

## Д. ОКОНЧАТЕЛЬНЫЙ ВИД ФОРМУЛЫ ДЛЯ Э. Д. С. ОБМОТКИ ЯКОРЯ; ПУЛЬСАЦИЙ Э. Д. С.

### 87. Окончательный вид формулы для э. д. с., индуктируемой в якорных обмотках

В случае кольцевого якоря э. д. с., индуктируемая в якорной обмотке, равна, как мы видели (158), среднему значению э. д. с. одной секции за полупериод  $e_{med}$ , умноженному на число последовательно соединенных секций  $q$  в одной параллельной ветви обмотки:

$$E = e_{med}q.$$

В общем случае, когда секция состоит из  $w_s$  витков, имеем (159):

$$e_{med} = B_{med}lv_a w_s$$

При  $2a$  параллельных ветвях обмотки число последовательно соединенных секций (165)

$$q = \frac{s}{2a}.$$

Подставляя выражение для  $v_a$  из (163) и

$$B_{\text{med}} = \frac{\Phi}{\tau l},$$

где  $\Phi$  — поток одного полюса, входящий в якорь, получаем для кольцевого якоря:

$$e_{\text{med}} = \frac{\Phi}{\tau l} l 2\tau \frac{pn}{60} \omega_s = 2\Phi \frac{pn}{60} \omega_s. \quad (188)$$

В случае барабанного якоря среднее значение э. д. с., индуцируемой за полупериод в одной секции якорной обмотки с диаметральной шагом, в два раза больше, чем в секции обмотки кольцевого якоря.

Таким образом, для барабанного якоря получаем:

$$e_{\text{med}} = 2 \cdot 2\Phi \frac{pn}{60} \omega_s. \quad (189)$$

Нетрудно видеть, что произведение  $e_{\text{med}}$  на  $q$  в обоих случаях приведет к одному и тому же выражению для  $E$

Так, для кольцевого якоря получим.

$$E = 2\Phi \frac{pn}{60} \omega_s \frac{s}{2a} = \frac{pn}{60} \Phi \frac{\omega_s s}{a},$$

а для барабанного якоря:

$$E = 2 \cdot 2\Phi \frac{pn}{60} \omega_s \frac{s}{2a} = \frac{pn}{60} \Phi 2 \frac{\omega_s s}{a}.$$

Заменяя число витков полным числом активных проводников на якоре  $N$  (161),  $N = \omega_s s$  для кольцевого якоря и  $N = 2\omega_s s$  для барабанного, окончательно в обоих случаях имеем:

$$E = \frac{pn}{60} \Phi \frac{N}{a}. \quad (190)$$

Здесь поток  $\Phi$  выражен в вольт-секундах; если поток подставлять в максвеллах, то (190):

$$E = \frac{pn}{60} \Phi \frac{N}{a} \cdot 10^{-8} \text{ в.} \quad (190a)$$

Это и есть окончательная формула для э. д. с., индуцируемой в обмотке якоря машины постоянного тока независимо от типа якоря — кольцевой или барабанный с диаметральной шагом.

Тот же результат мы получим, если будем исходить из изменения потока, пронизывающего контур витка якорной обмотки.

Среднее значение э. д. с.  $e'_{\text{med}}$  одного витка за полупериод может быть вычислено по формуле:

$$e'_{\text{med}} = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} e_x dt.$$

Подставляя сюда

$$e_x = - \frac{d\Phi_x}{dt},$$

получим

$$e'_{\text{med}} = - \frac{2}{T} \int_0^{T/2} d\Phi_x. \quad (191)$$

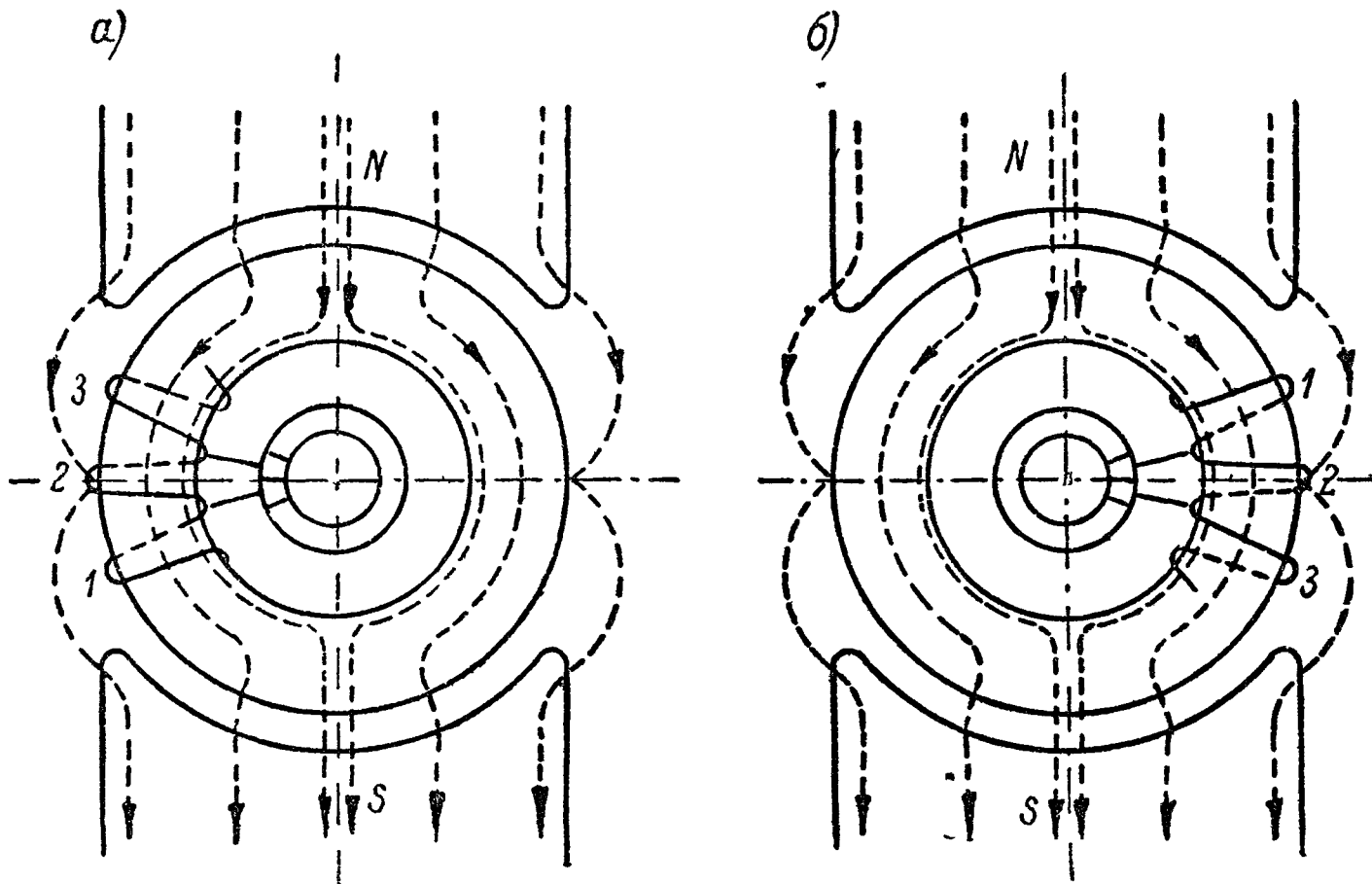
В кольцевом якоре в момент  $t = 0$  поток равен  $\Phi/2$ , а в момент  $t = T/2$  он равен  $(-\Phi/2)$ , так как виток повернется на угол  $\pi$ , и поток будет входить в него с обратной стороны (фиг. 129, а, б).

Таким образом,

$$e'_{\text{med}} = -\frac{2}{T} \left[ -\frac{\Phi}{2} - \frac{\Phi}{2} \right] = \frac{2\Phi}{T} = 2\Phi f, \quad (192)$$

где

$$\frac{1}{T} = f.$$



Фиг. 129. Картина магнитного потока в контуре витка кольцевого якоря:

$$a) \quad t = 0, \quad б) \quad t = \frac{T}{2}$$

При преобразовании кольцевой обмотки в барабанную с вынесением мертвых проводников на расстояние, равное полюсному делению  $\tau$  (диаметральная обмотка), виток будет охватывать уже не поток  $\Phi/2$ , а  $\Phi$  (фиг. 13, а, б). Поэтому для барабанного якоря получим:

$$\begin{aligned} e'_{\text{med}} &= \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} e_x dt = -\frac{2}{T} \int_{\Phi}^{-\Phi} d\Phi = \\ &= -\frac{2}{T} [-\Phi - \Phi] = \frac{4\Phi}{T} = 4\Phi f. \end{aligned} \quad (193)$$

Что касается  $q'$ , то для кольцевого якоря число витков на параллельную ветвь равно числу активных проводников  $N = w_s s$ , деленному на  $2a$ :

$$q' = \frac{N}{2a}, \quad (194)$$

а в случае барабанного якоря оно в два раза меньше, так как в секции два активных проводника.

Поэтому для барабанного якоря

$$q' = \frac{N}{2 \cdot 2a}, \quad (195)$$

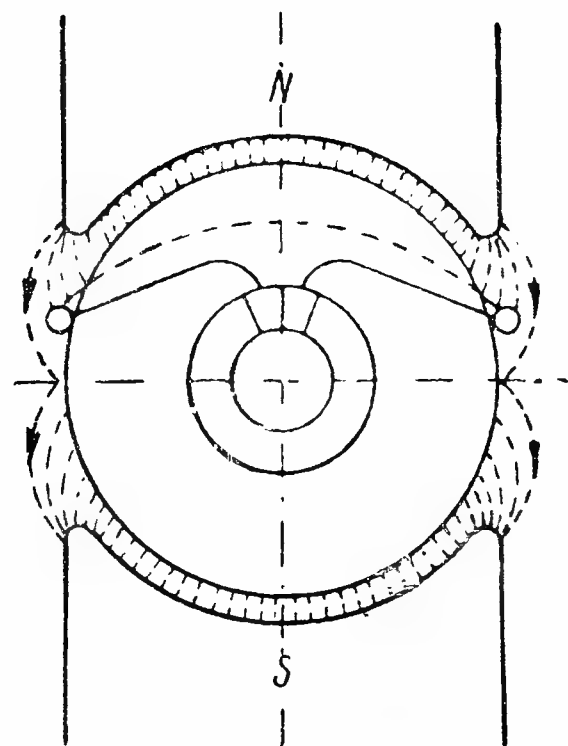
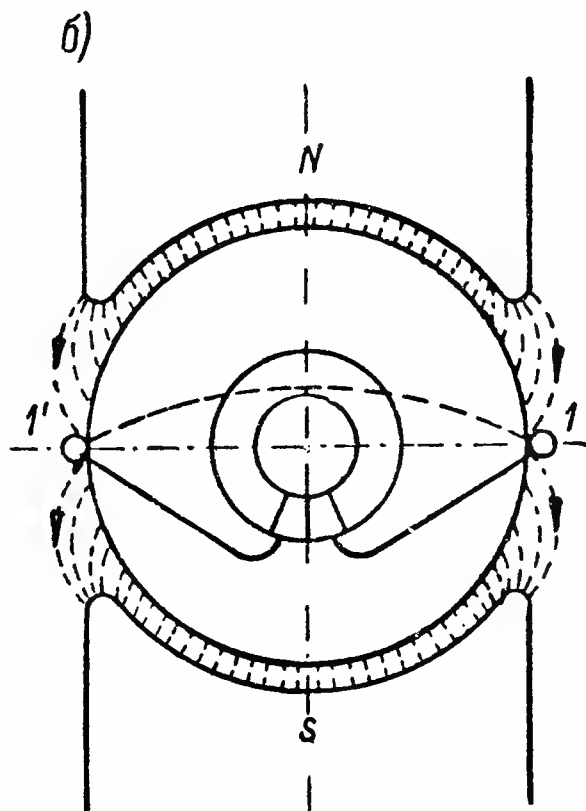
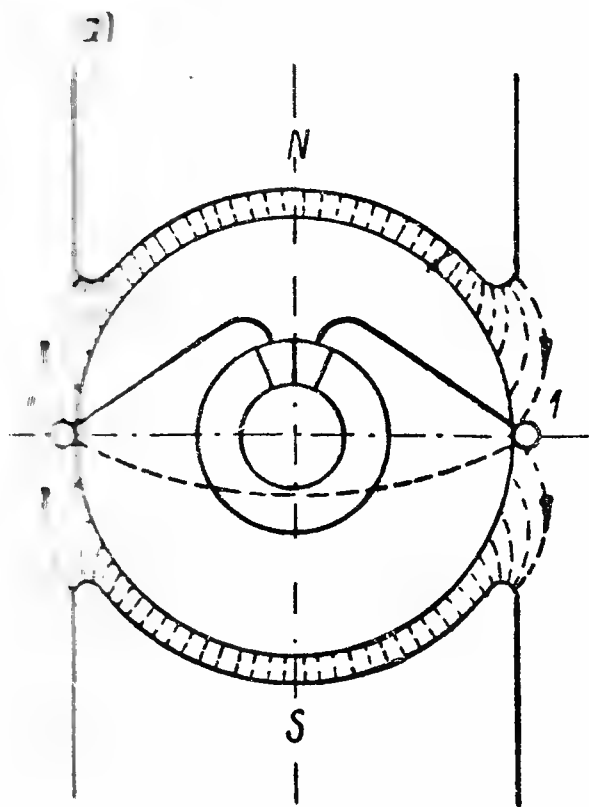


При вычислении э. д. с. якорной обмотки кольцевого якоря нужно в (158) ~~подставить~~ ~~подставить~~ выражения (192) и (194), а при вычислении э. д. с. барабанного ~~якоря~~ ~~якоря~~ нужно подставить (193) и (195); получим тождественные выражения:

$$E = \Phi f \frac{N}{a}.$$

Подставляя сюда вместо  $f$  его выражение (162), окончательно получаем ~~то же~~ ~~то же~~ выражение, что и раньше (190):

$$E = \frac{pn}{60} \Phi \frac{N}{a}.$$



Фиг. 130. Картина магнитного потока в контуре витка барабанного якоря:

а)  $t = 0$ ; б)  $t = \frac{T}{2}$ .

Фиг. 131. Магнитный поток в контуре витка хордовой барабанной обмотки.

В случае, когда при преобразовании кольцевой обмотки в барабанную приходится укладывать мертвые проводники на расстоянии, меньшем, чем  $\tau$  (хордовая обмотка), виток барабанной обмотки будет охватывать не весь поток, входящий в якорь, а меньший (фиг. 131). Если для потока, охватываемого витком, сохраним то же обозначение  $\Phi$ , то для потока, входящего в якорь, нужно ввести другое обозначение, например  $\Phi_a$ . Тогда можем написать:

$$\Phi_a = \sigma_a \Phi, \quad (196)$$

где  $\sigma_a > 1$ . Обычно

$$\sigma_a = 1,01 \div 1,03. \quad (197)$$

Это позволяет для хордовой барабанной обмотки сохранить тот же вид формулы для э. д. с., что и для диаметральной, и писать эту формулу, независимо от того, имеем ли кольцевую или барабанную обмотку с полным шагом (диаметральная обмотка) или с сокращенным шагом (хордовая обмотка):

$$E = \frac{pn}{60} \Phi \frac{N}{a} [\text{в}], \quad (198)$$

где поток  $\Phi$  выражен в вольт-секундах; при исчислении  $\Phi$  в максвеллах получим:

$$E = \frac{pn}{60} \Phi \frac{N}{a} \cdot 10^{-8} \text{ в}. \quad (198a)$$

## 88. О пульсациях э. д. с. на коллекторе

Чтобы иметь возможность оценить порядок пульсаций, которые претерпевает э. д. с. коллекторной машины, рассмотрим случай двухполюсной машины, имеющей синусоидальное поле и снабженной кольцевой параллельной обмоткой. Тогда для мгновенного значения э. д. с. проводника № 1 (см., например, фиг. 101) мы можем воспользоваться формулой  $e = E_m \sin \omega t$ , если за начало отсчета времени принять момент прохождения проводника через нейтраль. Для мгновенного значения э. д. с. любого из прочих проводников можем написать:

$$e_i = E_m \sin(\omega t + \varphi_i), \quad (199)$$

где  $\varphi_i$  — угол, составляемый радиусами, идущими к рассматриваемому проводнику и к проводнику № 1.

Э. д. с. между щетками на коллекторе напишется для фиг. 101 формулой:

$$E = \sum_{i=1}^{i=q} e_i, \quad (200)$$

что при подстановке дает:

$$E = E_m \{ \sin \omega t + \sin(\omega t + \varphi_2) + \dots + \sin(\omega t + \varphi_q) \}.$$

Из фиг. 101, а имеем:

$$\omega t = \frac{\alpha}{2}, \quad \varphi_2 = \alpha, \quad \varphi_3 = 2\alpha, \dots, \varphi_q = (q-1)\alpha, \quad (201)$$

поэтому

$$E = E_m \left\{ \sin \frac{\alpha}{2} + \sin \left( \frac{\alpha}{2} + \alpha \right) + \dots + \sin \left[ \frac{\alpha}{2} + (q-1)\alpha \right] \right\}. \quad (202)$$

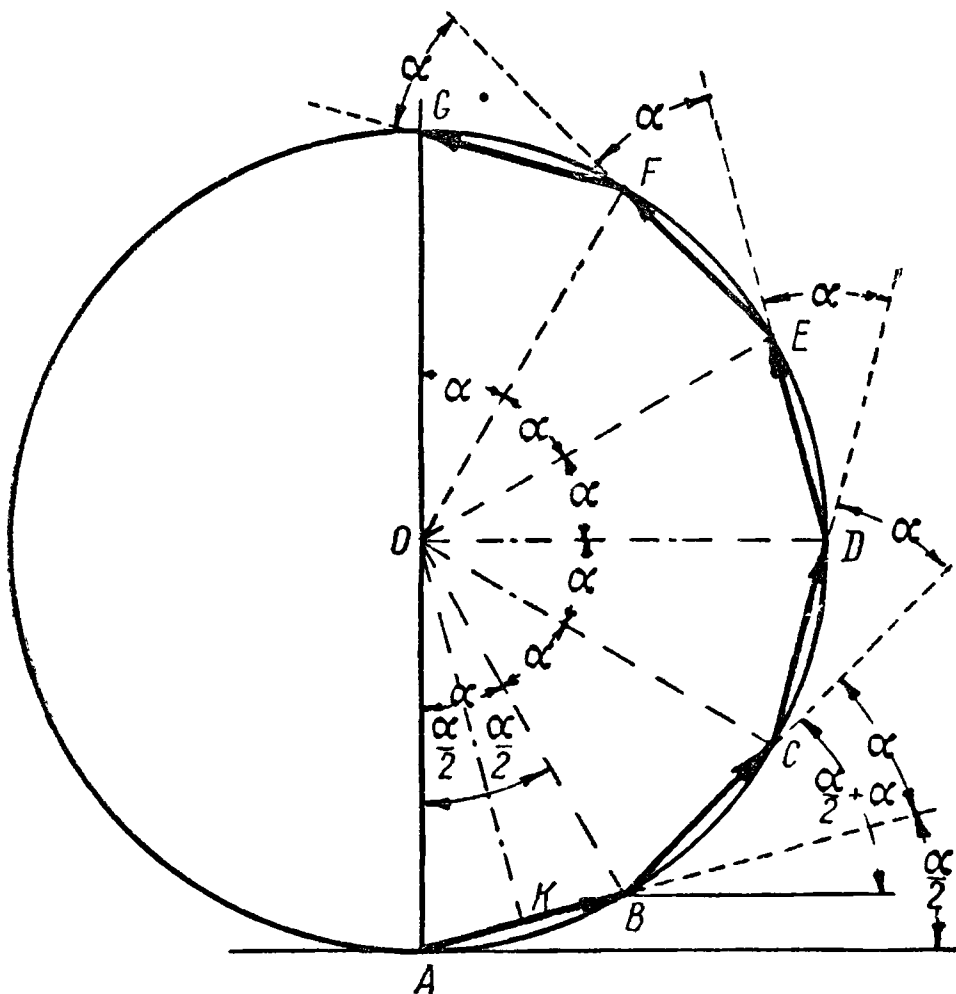
Эту сумму нетрудно вычислить, но мы прибегнем к графическому построению, указанному на фиг. 132. Для этого из точки  $A$  на оси абсцисс проводим под углом  $\alpha/2$  к ней вектор  $\overline{AB} = E_m$ . Из точки  $B$  проводим под углом  $\frac{\alpha}{2} + \alpha$  к оси абсцисс, т. е. под углом  $\alpha$  к вектору  $\overline{AB}$ , вектор  $\overline{BC}$  и т. д.

Мы видели, что в положении, данном на фиг. 101, а, э. д. с. между щетками равна максимальному значению э. д. с. полуобмотки из  $q$  проводников, а так как сумма синусоидальных величин одного и того же периода есть тоже величина синусоидальная, причем амплитуда (т. е. максимальное значение) результирующей синусоидальной величины равна геометрической сумме амплитуд слагаемых, то очевидно, что при построении суммы (202) мы должны после построения последней стороны многоугольника попасть точкой  $O$  на ось ординат. Тогда

$$E = \overline{AG}. \quad (203)$$

Так как стороны многоугольника  $A \dots G$ , имеющего  $q$  сторон, составляют друг с другом угол  $\alpha$ , причем

$$\alpha = \frac{2\pi}{2q} = \frac{2\pi}{K}, \quad (204)$$



Фиг. 132. Диаграмма для вычисления суммарной э. д. с., индуктированной в параллельной ветви якоря при положении щеток против середины коллекторных пластин.

то на основании теорем геометрии можем утверждать, что построенный многоугольник представляет половину правильного многоугольника, имеющего  $2q$  сторон. Радиус описанного около многоугольника круга легко определить из фиг. 132:

$$R = \frac{\overline{AG}}{2} = \overline{OA} = \frac{\overline{AK}}{\sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\overline{AB}}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{E_m}{2 \sin \frac{\alpha}{2}}, \quad (205)$$

а следовательно,

$$E = \overline{AG} = 2R = \frac{E_m}{\sin \frac{\alpha}{2}}. \quad (206)$$

Мы рассмотрели первое из двух крайних положений, которое якорь может занимать относительно щеток, а именно, когда щетки стоят против середины коллекторных пластин. Во втором крайнем положении щетки стоят против изоляционных прослоек (фиг. 101, б), отделяющих две смежные коллекторные пластины, вследствие чего они замыкают накоротко по одному проводнику и в каждой параллельной ветви обмотки имеем по  $(q - 1)$  активных проводников. Поэтому, применяя формулу (200), мы должны распространить суммирование на  $(q - 1)$  членов:

$$E = \sum_{i=1}^{i=q-1} e_i = E_m \{ \sin \omega t + \dots + \sin (\omega t + \varphi_{q-1}) \}.$$

Из фиг. 101, б имеем (201):

$$\omega t = \alpha; \quad \varphi_2 = \alpha; \quad \varphi_3 = 2\alpha; \dots; \varphi_{q-1} = (q - 2)\alpha,$$

поэтому

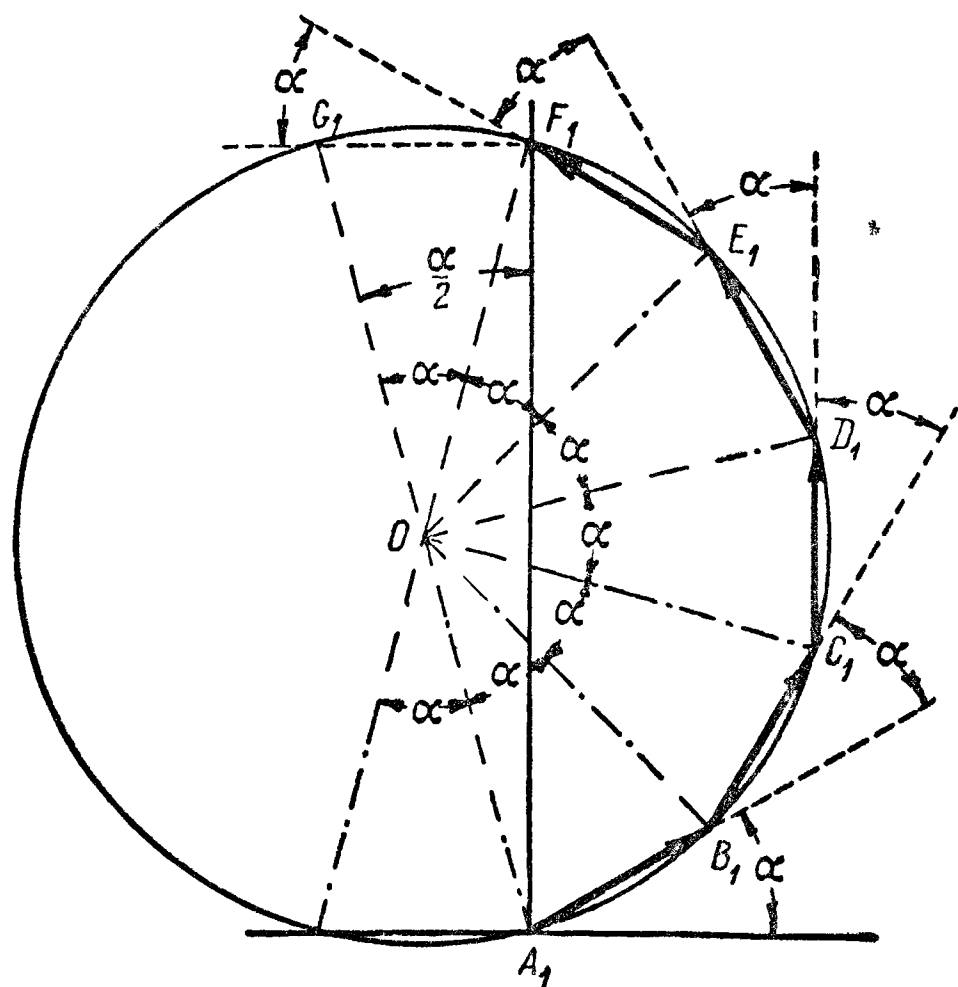
$$\begin{aligned} E &= E_m \{ \sin \alpha + \sin (\alpha + \alpha) + \sin (\alpha + 2\alpha) + \dots + \sin [\alpha + (q - 2)\alpha] \} = \\ &= E_m \{ \sin \alpha + \sin 2\alpha + \sin 3\alpha + \dots + \sin (q - 1)\alpha \}. \end{aligned} \quad (207)$$

Строя эту сумму, получим фиг. 133. Так как в этом случае  $(q - 1)$  проводников, образующих одну параллельную ветвь машины, расположены симметрично относительно оси полюсов, то мы имеем дело с полуобмоткой, находящейся в момент, когда э. д. с. проходит через максимум. Отсюда следует, что точка  $F_1$  многоугольника на фиг. 133 должна оказаться на оси ординат, а тогда

$$E_g = \overline{A_1 F_1}. \quad (208)$$

Очевидно, что построенный многоугольник  $A_1 \dots F_1$  эквивалентен многоугольнику  $A \dots F$  на фиг. 132; поэтому можем написать:

$$\overline{A_1 F_1} = \overline{AF} = \overline{A_1 G_1} \cos \frac{\alpha}{2} = \overline{AG} \cos \frac{\alpha}{2} = E_m \cos \frac{\alpha}{2}. \quad (209)$$



Фиг. 133. Диаграмма для вычисления суммарной э. д. с., индуктированной в параллельной ветви якоря при положении щеток против изоляционных прослоек

Таким образом, э. д. с. нашей машины будет претерпевать колебания между двумя значениями:

и

$$\left. \begin{aligned} E_g' &= \overline{AG} = \frac{E_m}{\sin \frac{\alpha}{2}} \\ E_g'' &= \overline{A_1F_1} = \overline{AG} \cos \frac{\alpha}{2} = E_m \cos \frac{\alpha}{2} . \end{aligned} \right\} \quad 211$$

Среднее значение  $E$ :

$$E = \frac{E' + E''}{2} = \frac{1}{2} \left( \overline{AG} + \overline{AG} \cos \frac{\alpha}{2} \right) . \tag{211}$$

Наибольшее отклонение от среднего значения.

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \left( \overline{AG} - \overline{AG} \cos \frac{\alpha}{2} \right) . \tag{212}$$

В процентах к среднему значению это дает.

$$\varepsilon \% = \frac{\frac{1}{2} \left( \overline{AG} - \overline{AG} \cos \frac{\alpha}{2} \right)}{\frac{1}{2} \left( \overline{AG} + \overline{AG} \cos \frac{\alpha}{2} \right)} \cdot 100 = \frac{1 - \cos \frac{\alpha}{2}}{1 + \cos \frac{\alpha}{2}} \cdot 100 = 100 \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{4} . \tag{212}$$

Формула (212а) выведена применительно к двухполюсной машине. Для многополюсной машины нужно, прежде чем пользоваться ею, перевести пространственный угол  $\alpha$ , определяемый формулой (204), в электрические градусы, для чего его нужно умножить на  $p$ :

Таблица 12  
Зависимость  $\varepsilon\%$  от  $q$

$q = \frac{K}{2p}$	$\alpha = \frac{180^\circ}{q}$	$\varepsilon\%$
1	180°	100
2	90°	17,2
3	60°	7,2
4	45°	4,0
5	36°	2,51
6	30°	1,74
8	22,5°	0,97
10	18°	0,62
15	12°	0,28
20	9°	0,155
30	6°	0,069
45	4°	0,030

$$\alpha_e = \frac{2\pi}{K} p = \frac{\pi}{K/2p} = \frac{\pi}{q} , \tag{213}$$

иначе говоря, при вычислении  $\alpha$  нужно в знаменатель формулы (204) подставить число коллекторных пластин, приходящихся на пару полюсов.

В табл. 12 произведено вычисление  $\varepsilon\%$  для разных значений  $K/2p$ . Из таблицы следует, что уже при  $K/2p = 8$ , т. е. при 16 коллекторных пластинах на пару полюсов,  $\varepsilon\% = 0,97$ , т. е.  $< 1\%$ . Взяв число коллекторных пластин на пару полюсов нечетное и рассмотрев два крайних положения якоря относительно щеток, получим, что

$$\varepsilon \% = 100 \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{8} , \tag{212 б}$$

т. е. пульсации будут еще меньше.



## ГЛАВА IV

### ЗАМКНУТЫЕ ОБМОТКИ ЗУБЧАТЫХ БАРАБАНЫХ ЯКОРЕЙ И ИНДУКТИРУЕМАЯ В НИХ Э. Д. С. ХОЛОСТОГО ХОДА

#### А. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ВСЕХ ТИПОВ ОБМОТОК

##### 89. Введение

В предшествующей главе были изложены основы замкнутых обмоток зубчатых барабанных якорей и было показано, что эти обмотки, по существу, отличаются от кольцевых обмоток только увеличением в два или почти в два раза э. д. с. обмотки из-за вынесения на наружную поверхность внутренних мертвых проводников и укладки их на расстоянии полюсного деления от первоначальных активных проводников кольцевой обмотки; при вынесении проводников на наружную поверхность якоря на расстояние, меньшее, чем полюсное деление, э. д. с. обмотки увеличивается меньше, чем в два раза, но если условиться, чтобы в формулу для э. д. с. обмотки входил поток, охватываемый обмоткой, то выражение для э. д. с. сохранится полностью, в чем мы убедились в § 87. Сейчас займемся установлением прочих положений, общих всем типам обмоток.

##### 90. Обобщение формулы для коллекторного и секционного якорного шага обмотки

В общем случае для регулярных последовательных обмоток кольцевого якоря мы получили следующую формулу для коллекторного и секционного якорного шага обмотки (187):

$$y_k = \frac{K \pm a}{p} = \frac{s \pm a}{p} = y_s.$$

Условливаясь всегда делать правый обход обмотки (§ 73), получаем:

$$y_k = y_s = \frac{K \pm a}{p},$$

что можно представить так:

$$y_k = y_s = \frac{K}{p} \pm \frac{a}{p} = \frac{K}{p} \pm x_k.$$

Здесь

$$\frac{K}{p} = \left( \frac{K}{2p} \right) 2, \quad x_k = \frac{a}{p}, \quad (214)$$

т. е.  $\frac{K}{p}$  равно двойному полюсному делению  $\frac{K}{2p}$  по коллектору, измеренному числом коллекторных делений, а  $x_k = \frac{a}{p}$  представляет собой сдвиг в магнитном поле, измеренный числом коллекторных делений, совершаемый при каждом переходе по схеме обмотки от одного активного проводника к следующему.

Таким образом, можно написать:

$$y_s = y_k = 2 \frac{K}{2p} \pm \frac{a}{p}. \quad (215)$$

Для параллельных обмоток сдвиг в магнитном поле равен:

$$x_k = m = \frac{a}{p}. \quad (216)$$

Сопоставляя это выражение с (215), нетрудно объединить формулы для коллекторного и секционного якорного шага как для последовательных, так и для параллельных обмоток, написав:

$$y_s = y_k = y_p \frac{K}{2p} \pm \frac{a}{p} = \frac{y_p K \pm 2a}{2p}. \quad (217)$$

В самом деле, первый член в (215), а именно  $2 \frac{K}{2p}$  является характерным для последовательных обмоток, в которых мы, прежде чем совершить сдвиг в магнитном поле, переходим через двойное полюсное деление по часовой стрелке, вследствие чего для них коэффициент  $y_p = 2$ ; его мы можем назвать шагом по полю. В параллельных обмотках мы сразу совершаем сдвиг в поле, оставляясь под полюсом той же полярности, а поэтому для них  $y_p = 0$ .

Таким образом, формула (217) годится как для параллельных, так и для регулярных последовательных обмоток.

Желая обобщить ее и на скачкообразные последовательные обмотки, можем, очевидно, написать:

$$y_s = y_k = \frac{y_p h K \pm 2a}{2p}, \quad (218)$$

где  $h$  — целое число; для регулярных обмоток  $h = 1$ .

### 91. Условия кратности замыкания якорной обмотки

Выясним, какие условия должны быть выполнены для того, чтобы обмотка была  $g$  раз разомкнутой. Многократно ( $g$  раз) замкнутая обмотка распадается, как мы видели, на  $g$  совершенно одинаковых обмоток, следовательно, в ней должно быть в  $g$  раз больше параллельных ветвей и коллекторных пластин. Вследствие этого и шаг ее по коллектору, измеряемый числом коллекторных делений, должен быть в  $g$  раз больше, чем в случае каждой отдельной обмотки.

Предположим, что имеем на якоре однократно замкнутую обмотку; тогда шаг  $y_k$  для нее напишется формулой (218). Умножив обе части этой формулы на  $g$ , получим:

$$y_k g = \frac{y_p h K g \pm 2a g}{p}. \quad (219)$$

Введем обозначения:

$$y_k g = y_k'; \quad y_p h K g = K'; \quad a g = a'.$$

Тогда можем написать:

$$y_k' = \frac{K' \pm 2a'}{p}, \quad (219a)$$

откуда следует, что число замыканий данной обмотки в независимые обмотки равняется общему наибольшему делителю  $y_k'$ ,  $K'$  и  $a'$ . Следовательно, обмотка только тогда будет однократно замкнутой, если  $y_k'$ ,  $K'$  и  $a'$  — числа взаимно простые.

Если  $y_k'$ ,  $K'$  и  $a'$  имеют общий наибольший делитель  $g > 1$ , то число  $g$  будет числом, указывающим кратность замыканий обмотки в отдельные самостоятельные обмотки.

## 92. Вычисление частичных секционных шагов обмотки барабанного зубчатого якоря

а) **Равносекционные обмотки.** Одним из преимуществ барабанных зубчатых якорей является возможность изготовления их обмоток из шаблонных якорных катушек, число которых равняется числу реальных впадин. Одна сторона шаблонной якорной катушки лежит сверху одной реальной впадины, другая — внизу другой реальной впадины под полюсом другой полярности. Для осуществления такой обмотки необходимо выполнение определенного условия, а именно, чтобы первый частичный секционный шаг  $y_{s1}$  был кратным  $u_s$  — числу элементарных пазов в одном реальном пазу, как это сейчас будет показано.

Действительно, шаг  $y_{s1}$  измеряется числом промежутков между элементарными пазами, а следовательно, должен быть числом целым. С другой стороны,  $y_{s1}$  должен равняться, примерно, полюсному делению  $\tau$ . Так как число секций обмотки равно числу коллекторных пластин  $K$ , то полюсное деление якоря, измеренное числом промежутков между элементарными впадинами, равно:

$$\frac{K}{2p} = \frac{Zu'_s}{2p},$$

так как  $K = Zu_s$ . Если  $\frac{Z}{2p} = \text{ц. ч.}$ , то, взяв

$$y_{s1} = \frac{Z}{2p} u_s,$$

мы получим обмотку с диаметральной шагом, причем шаг  $y_{s1}$  будет числом, кратным  $u_s$ . Нетрудно убедиться, что в этом случае, если первая сторона секции лежит сверху первой элементарной впадины данного реального паза, то вторая сторона секции должна лежать внизу первого элементарного паза того реального паза, который находится на расстоянии  $\tau$  от исходного реального паза (фиг. 134, а). В этом случае все  $u_s$  проводников, лежащих сверху одного реального паза, можно обмотать вместе, так же как и соответствующие им нижние стороны, лежащие внизу другого реального паза, и получить шаблонную катушку. Подобная обмотка зубчатого барабанного якоря может быть названа **равносекционной обмоткой**, — все секции имеют равную ширину (фиг. 135).

Если  $\frac{Z}{2p} \neq \text{ц. ч.}$ , то, взяв ближайшее целое число, что обозначим через  $\left(\frac{Z}{2p}\right)_+$ , и положив

$$y_{s1} = \left(\frac{Z}{2p}\right)_+ u_s - u_s = \left[\left(\frac{Z}{2p}\right)_+ - 1\right] u_s, \quad (220)$$

мы вновь получим возможность осуществить шаблонную, равносекционную обмотку, но теперь обмотка будет хордовой, так как  $\left[\left(\frac{Z}{2p}\right)_+ - 1\right]$  меньше  $\tau$ .

б) **Ступенчатые обмотки.** Если для шага  $y_{s1}$  написать:

$$y_{s1} = \left(\frac{Z}{2p}\right)_+ u_s - \varepsilon_s \quad (221)$$

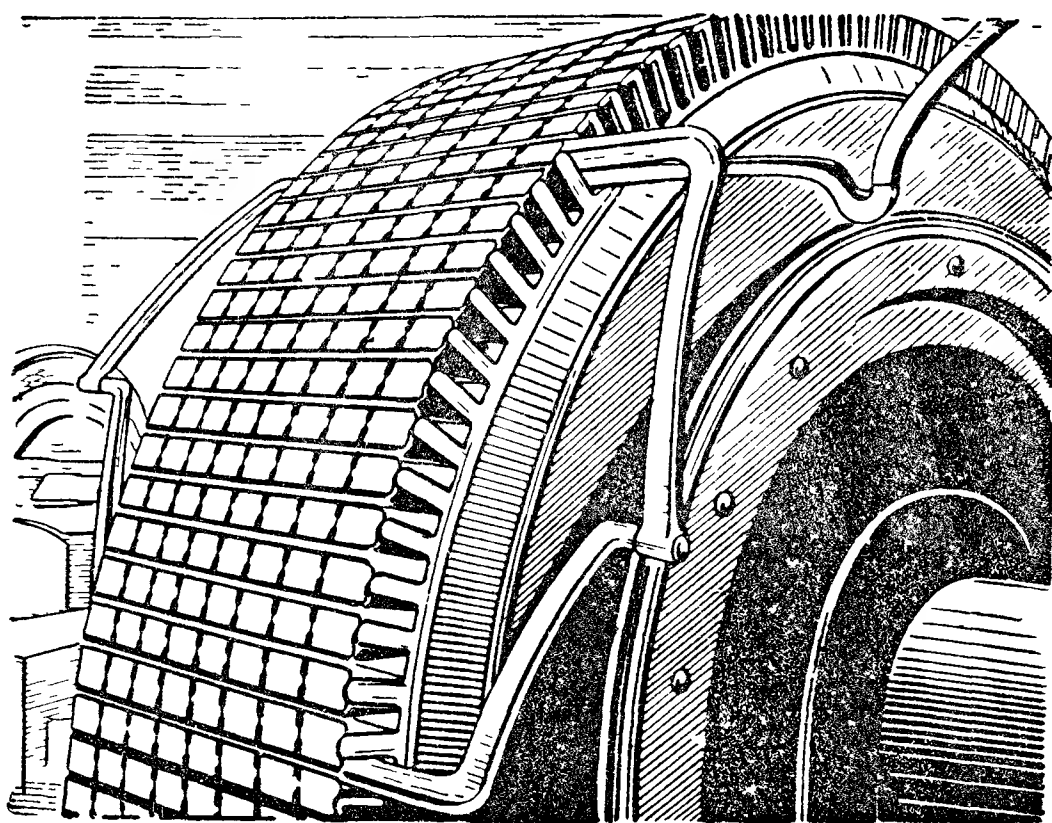
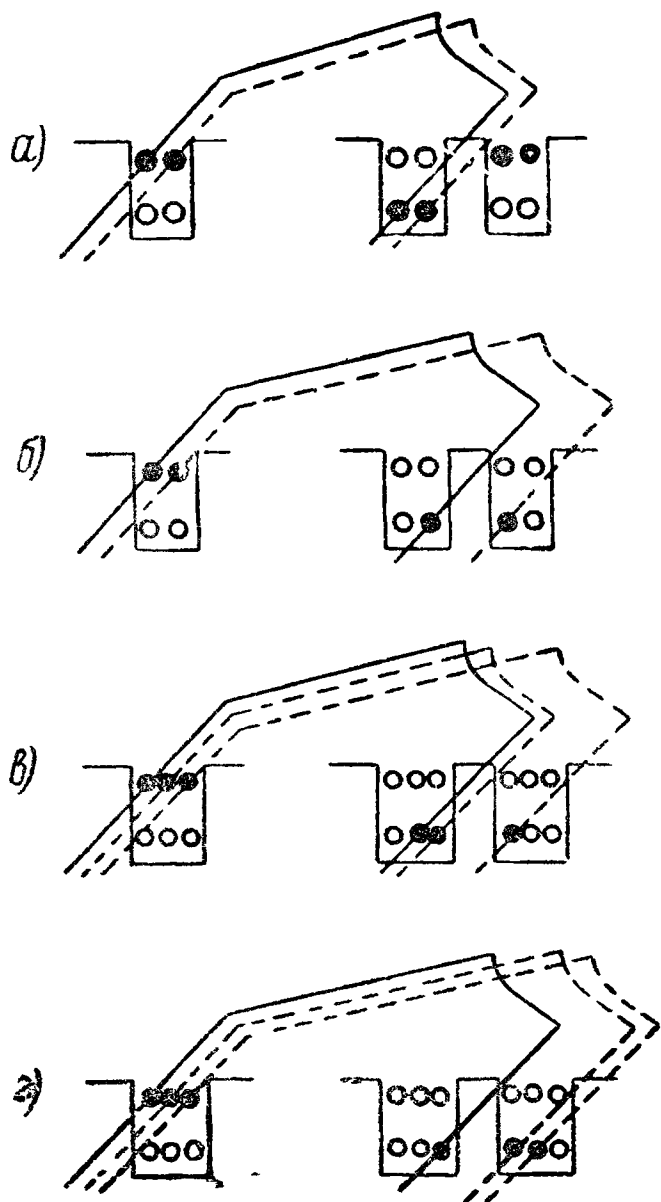
и взять целое число  $\varepsilon_s < u_s$ , то получим ступенчатую обмотку, секции которой будут разной ширины, как это показано на фиг. 134, в, г, где  $u_s = 3$ , а величина  $\varepsilon_s$  взята на фиг. 134, в равной 1, а на фиг. 134, г равной 2.

Ступенчатая обмотка находит применение в крупных машинах постоянного тока, в которых секции одновитковые ( $w_s = 1$ ) и делаются из плоской

меди. В этих случаях отказ от шаблонных катушек не представляет значительных производственных осложнений (хотя и удорожает изготовление обмотки, но в коммутационном отношении ступенчатая обмотка имеет ценное преимущество (показано дальше), почему и используется

Деля (220) на  $u_s$ , получим:

$$y_n = \left( \frac{Z}{2p} \right)_+ - 1, \quad (222)$$



Фиг. 134. Картина расположения секций в пазах при равносекционной и ступенчатой обмотках.

Фиг. 135. Секции в пазах якоря при равносекционной обмотке.

— шаг равносекционной обмотки по реальным впадинам; он измеряется числом промежутков между реальными впадинами. Деля на  $u_s$  выражение (221) для  $y_{s1}$  ступенчатой обмотки, получим:

$$y_n = \left( \frac{Z}{2p} \right)_+ - \xi_n, \quad (223)$$

где

$$\xi_n = \frac{\varepsilon_s}{u_s} \quad (224)$$

Так как  $\varepsilon_s < u_s$ , то  $\xi_n$  — правильная дробь и  $y_n$  — число дробное, причем  $\xi_n$  будет одинаковым для всех секций ступенчатой обмотки, хотя ширина их разная.

Если измерять шаг обмотки числом зубцов, охватываемых секцией, и обозначать его через  $y_z$  — шаг обмотки по зубцам, то для одних секций ступенчатой обмотки (для узких секций)  $y_z$  будет равно ближайшему меньшему целому числу к  $\frac{Z}{2p}$ , а для других (широких) секций — ближайшему большему числу к  $\frac{Z}{2p}$ :

$$\left. \begin{aligned} y_z &= (y_n)_- \text{ — для узких секций,} \\ y_z &= (y_n)_+ \text{ — для широких секций.} \end{aligned} \right\} \quad (225)$$

Здесь  $(y_n)_-$  и  $(y_n)_+$  обозначают ближайшее меньшее целое число и, соответственно, ближайшее большее целое число

Так как  $y_s = y_{s1} \mp y_{s2}$ , то, зная  $y_{s1}$ , легко найти  $y_{s2}$ :

$$y_{s2} = \pm (y_s - y_{s1}). \quad (226)$$



### 93. Общие условия симметрии зубчатых барабанных обмоток

До сравнительно недавнего времени на практике пользовались, как правило, только симметричными барабанными обмотками. Из несимметричных барабанных обмоток находили себе иногда применение лишь искусственно амкнутая последовательная обмотка (§ 101) и последовательная обмотка с мертвыми секциями (§ 100). Ныне находят себе применение и несимметричные множественные параллельные барабанные обмотки (§ 104б).

Прежде чем говорить о несимметричных барабанных обмотках, постараемся сформулировать условия симметрии барабанных обмоток, исходя из рассмотренных выше условий симметрии кольцевых обмоток.

Для простой параллельной обмотки многополюсного кольцевого якоря условие ее практической симметрии сводилось к тому, чтобы (166):

$$\frac{K}{a} = \text{ц. ч.}$$

Так как в простой последовательной обмотке  $a = 1$ , то это условие в ней всегда выполняется, поэтому можно сказать, что для простых параллельных и для простых последовательных обмоток кольцевого якоря условие симметрии сводится к равенству (166), которое в симметричных обмотках всегда выполняется.

При преобразовании симметричных простых обмоток кольцевого якоря в обмотки зубчатого барабанного якоря с  $u_s = 1$ , по правилу, указанному в конце § 84, мы получим также симметричные обмотки, причем в барабанной обмотке каждый реальный паз будет состоять из одного элементного паза. Объединяя по одинаковому числу элементных пазов в одном реальном паду, получим, очевидно.

$$\frac{K}{Z} = u_s = \text{ц. ч.} \quad (227)$$

Это явится новым условием симметрии простых обмоток зубчатого барабанного якоря.

Чтобы барабанная обмотка якоря была симметричной, необходимо, чтобы все ветви ее занимали в отношении полюсов одинаковое положение, а это будет тогда, когда

$$\frac{Z}{a} = \text{ц. ч.} \quad (228)$$

Это является вторым специальным условием для симметрии простых обмоток зубчатого барабанного якоря. При выполнении первого специального условия для их симметрии  $\left(\frac{K}{u_s} = \text{ц. ч.}\right)$  и второго условия  $\left(\frac{Z}{a} = \text{ц. ч.}\right)$  условие, выведенное для симметричных кольцевых обмоток  $\left(\frac{K}{a} = \text{ц. ч.}\right)$ , всегда выполняется, как это видно из следующего соотношения:

$$\frac{K}{a} = \frac{u_s Z}{a}. \quad (229)$$

Таким образом, для симметрии простых обмоток зубчатого барабанного якоря должны выполняться условия:

$$\left. \begin{aligned} \text{(I)} \quad \frac{K}{Z} &= u_s = \text{ц. ч.} \\ \text{(II)} \quad \frac{Z}{a} &= \text{ц. ч.} \end{aligned} \right\} \quad (230)$$

Для симметрии множественных параллельных и множественных последовательных обмоток кольцевого якоря мы имели дополнительное условие (§ 77):

$$\frac{2p}{a} = \text{ц. ч.}$$

Для множественных параллельных обмоток  $a = mp$ ; подставляя это в предыдущее соотношение, получаем:

$$\frac{2p}{mp} = \frac{2p}{mp} = \frac{2}{m} = \text{ц. ч.} \quad (231)$$

Отсюда следует, что множественная параллельная обмотка может быть симметричной только при  $m = 2$ .

В случае множественной последовательной обмотки шаг по коллектору

$$y_k = \frac{K \pm a}{p}$$

должен быть целым числом.

Это создает при расчете множественной последовательной обмотки большие ограничения; в дальнейшем мы подробнее остановимся на этих вопросах.

Резюмируя, можем сказать, что для симметричных зубчатых якорей условия симметрии сводятся к следующим:

$$\frac{Z}{a} = \text{ц. ч.}; \quad \frac{K}{Z} = \text{ц. ч.}; \quad \frac{2p}{a} = \text{ц. ч.} \quad (232)$$

Применение этих условий к отдельным типам зубчатых барабанных обмоток дано дальше.

#### 94. Об уравнительных соединениях

Соблюдение при конструировании якорных обмоток выведенных условий для их симметрии не гарантирует еще во многих случаях вполне удовлетворительной работы обмоток. Существует ряд факторов, весьма разнообразных, которые в той или иной степени могут повлиять на работу обмоток неблагоприятным образом и которые вызвали применение в обмотках уравнительных соединений.

Уравнительными соединениями якорных обмоток называются соединения проводниками соответствующих сечений точек одинакового потенциала, т. е. равнопотенциальных.

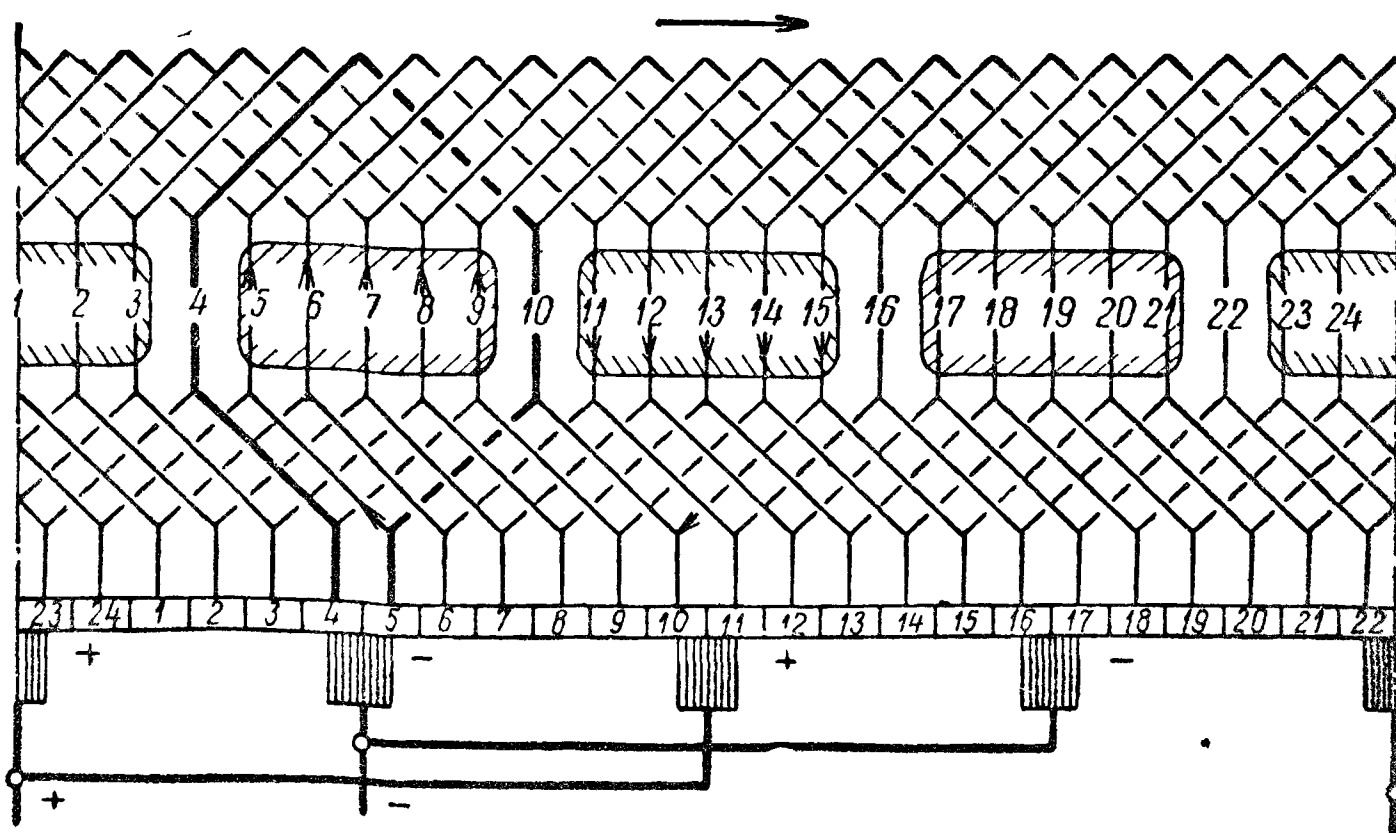
В общем случае различают уравнительные соединения первого рода, устраиваемые в простых обмотках, и уравнительные соединения второго рода, устраиваемые в множественных якорных обмотках. Имеются еще уравнительные соединения третьего рода.

#### 95. Схемы обмоток

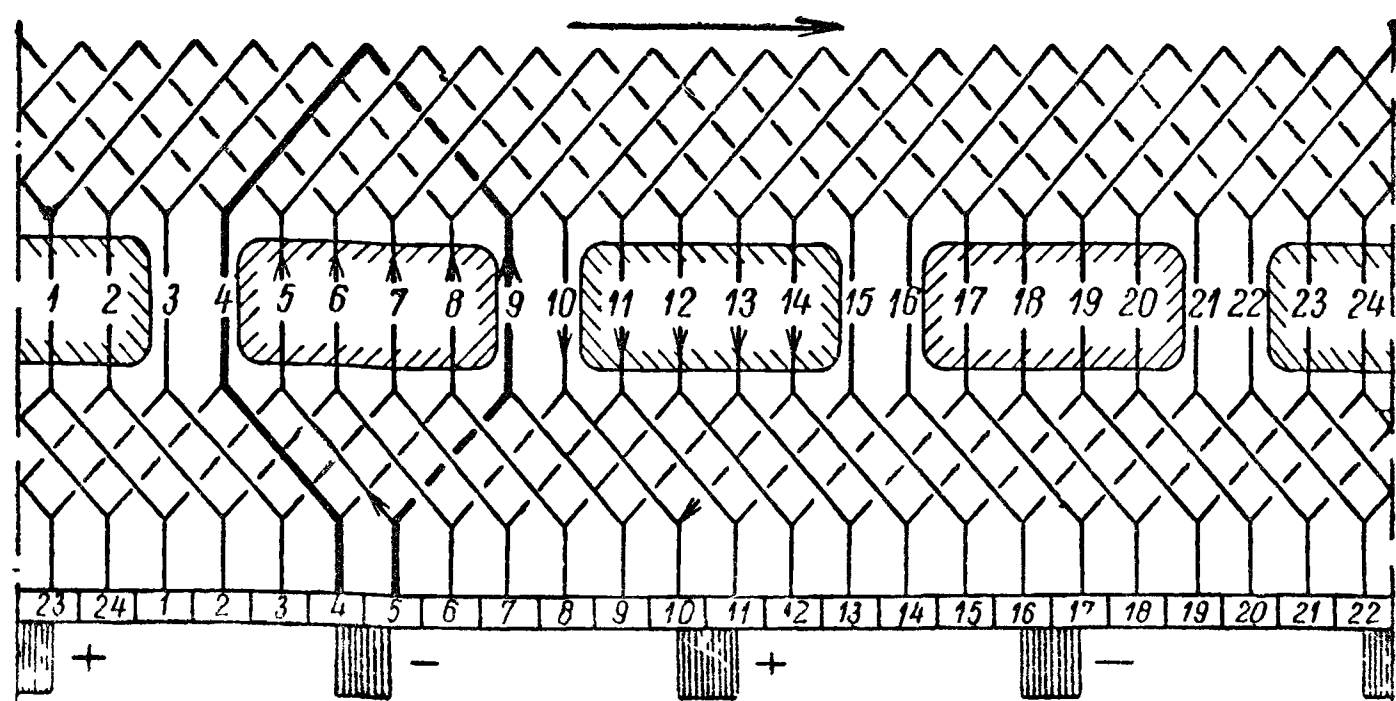
а) Показательные схемы развертки. Рассмотрим фиг. 136 и 137; на первом дана схема диаметральной, на втором — хордовой простой параллельной обмотки; в обоих случаях  $K = S = 24$ , причем  $u_s = 1$ . Нижний слой лобовых соединений индуктируемых сторон вычерчен пунктиром. Одна из короткозамкнутых секций отмечена жирными линиями. Положение полюсных наконечников показано прямоугольниками с заштрихованными краями, причем для северных полюсов штриховка идет от верхнего левого к нижнему правому углу прямоугольника (параллельно наклонной палочке в букве N), а для южных от правого верхнего угла к нижнему левому. Вращение обмотки принято, как и раньше, по часовой стрелке, чему на схеме соответствует движение слева направо. Этим определяется направление индуктируемых в сторонах обмотки э. д. с., показанное стрелками.

На фиг. 138 дана схема хордовой параллельной обмотки с нечетным числом коллекторных пластин на пару полюсов:  $K = S = 22$ ;  $p = 2$ . Сокращение шага здесь относительно меньше, чем на фиг. 137.

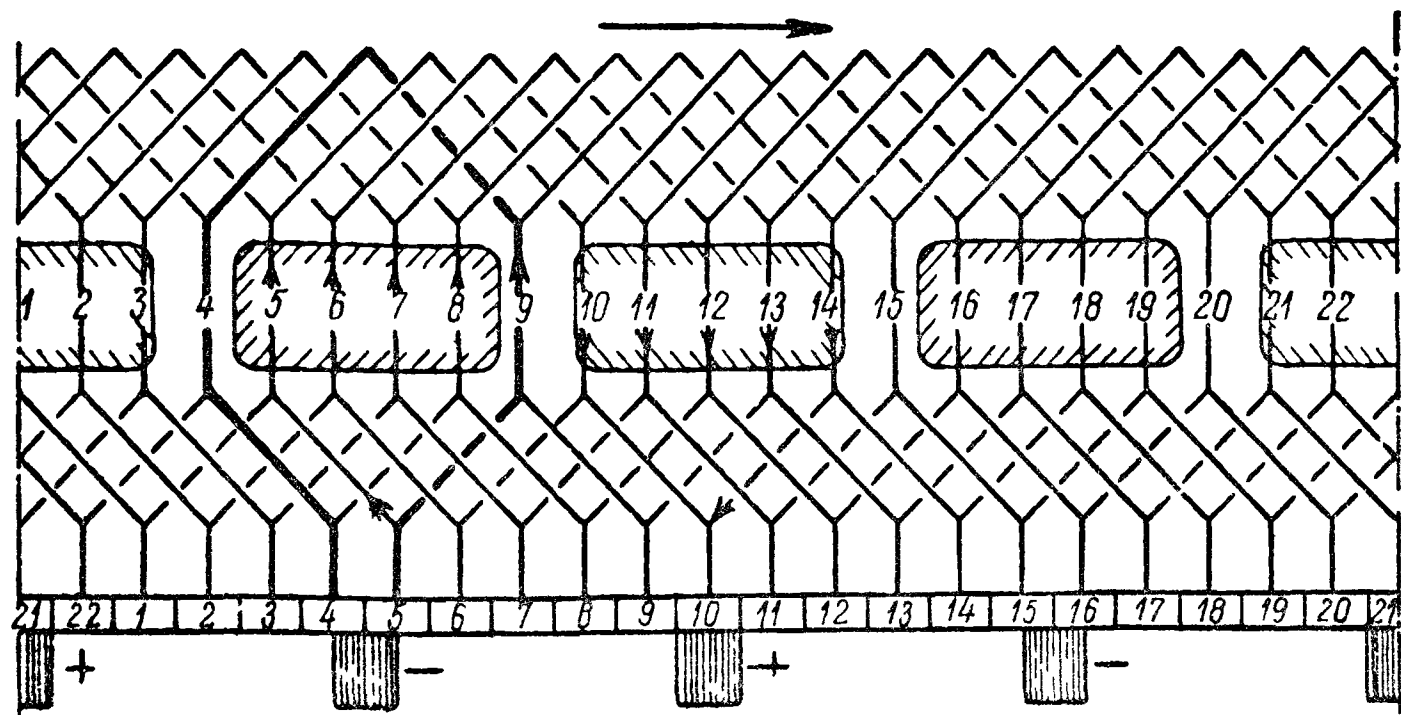
В приведенных примерах  $u_s = 1$ . При вычерчивании схем обмоток, имеющих  $u_s > 1$ , надлежит иметь в виду, что с точки зрения генерирования



Фиг. 136. Схема диаметральной простой параллельной обмотки.



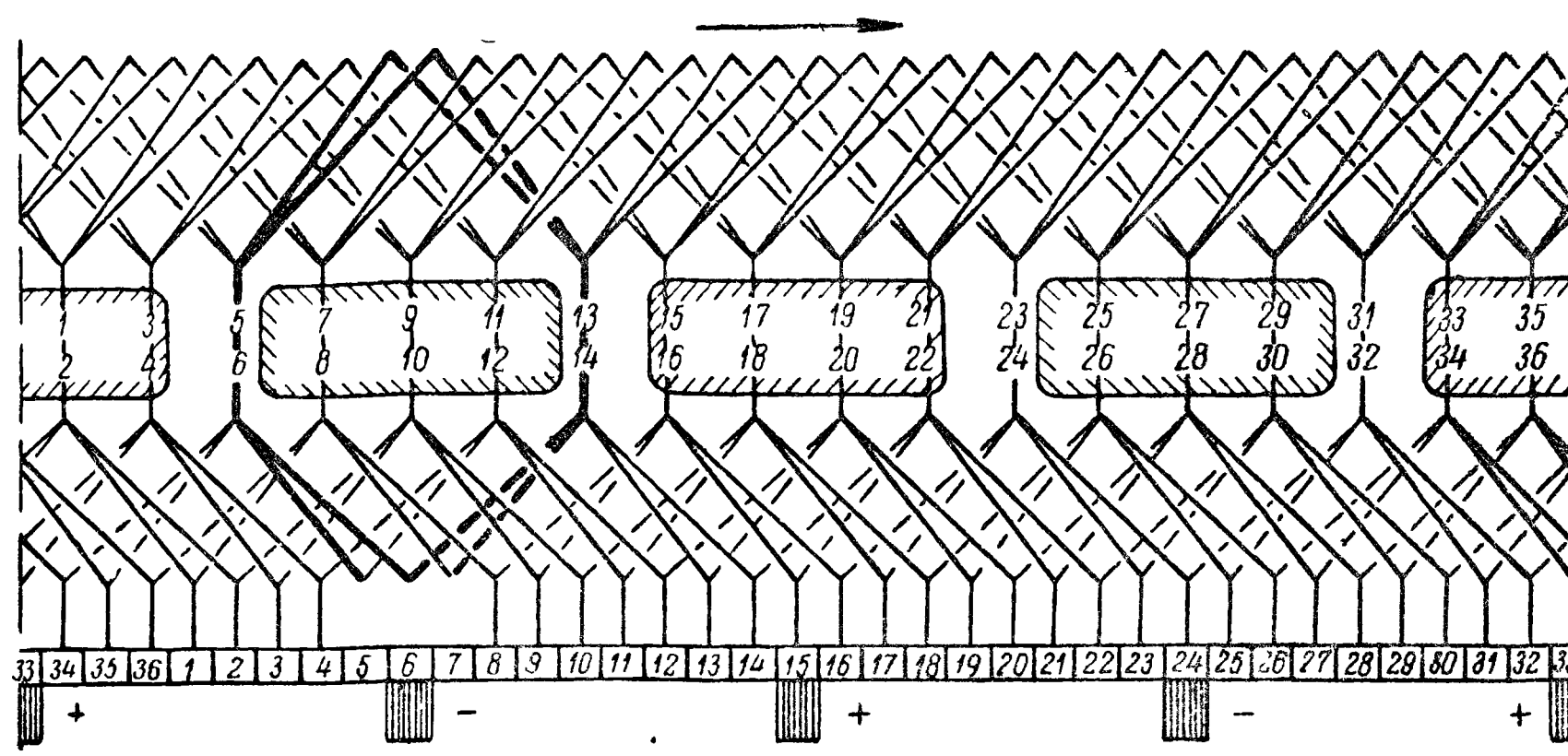
Фиг. 137. Схема хордовой простой параллельной обмотки.



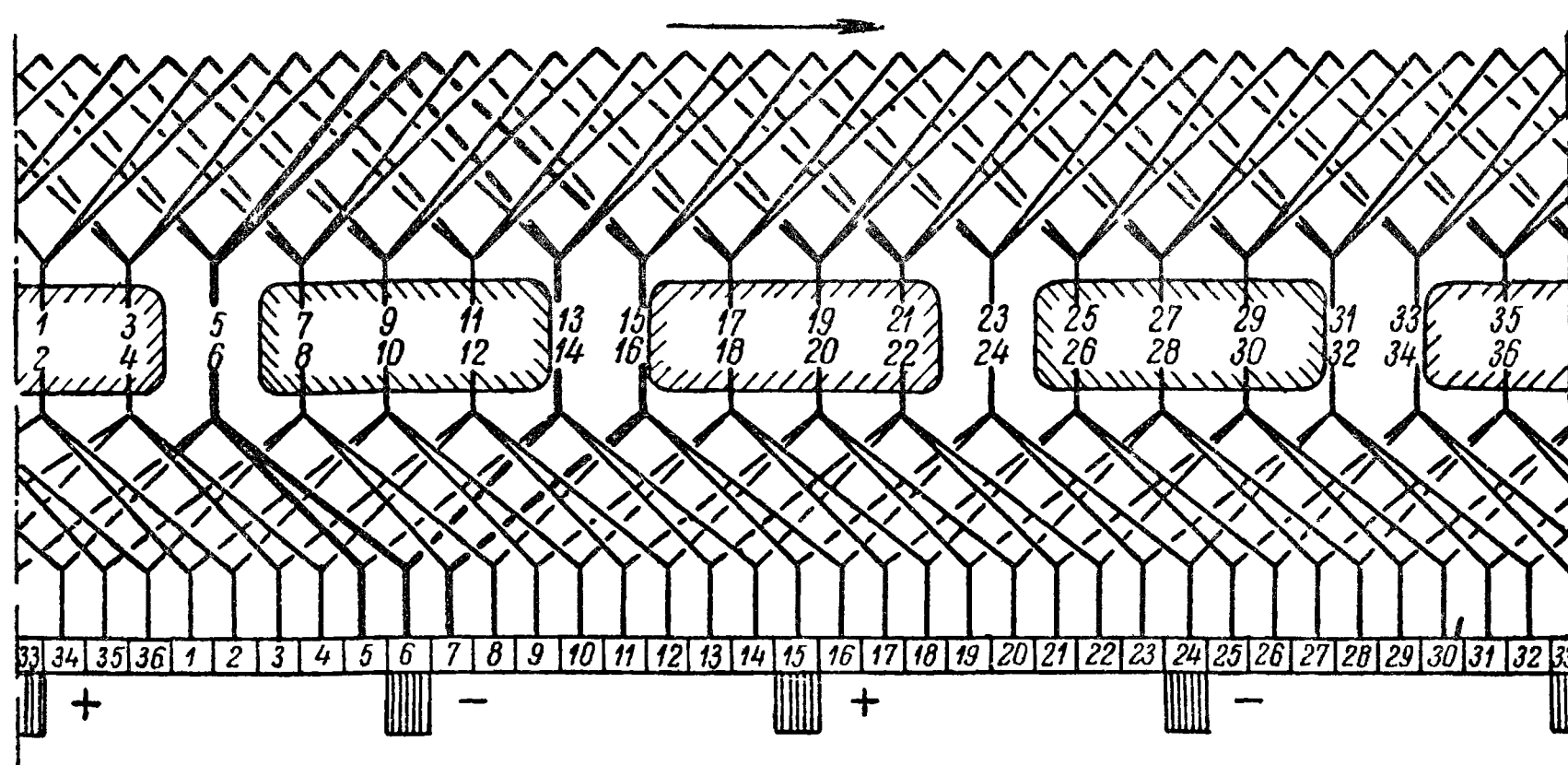
Фиг. 138. Схема хордовой простой параллельной обмотки с нечетным числом коллекторных пластин на пару полюсов.

э. д. с. все  $u_s$  элементарных впадин следует рассматривать как бы совмещенными с серединами реальных пазов. Такое изображение схемы возможно без нарушения ее наглядности, если лобовые соединения секций, лежащие в действительности рядом, рисовать так, как это показано на фиг. 139, где дана схема равносекционной хордовой обмотки, и на фиг. 140, где представлена схема обмотки ступенчатой; в обеих обмотках  $u_s = 2$ ,  $K = S = 36$ , шаги приведены в фигурах.

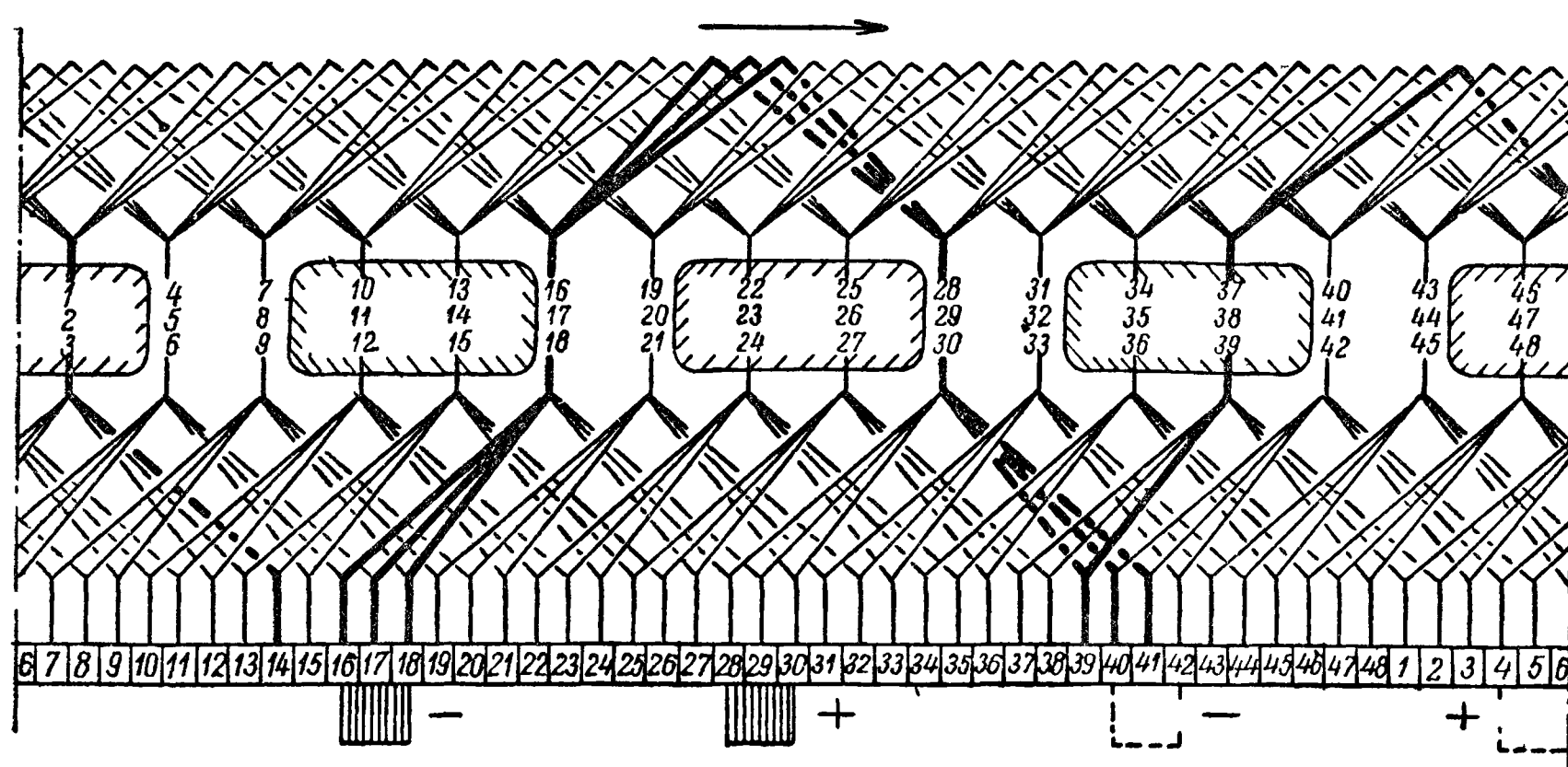
В качестве примеров схем для волновых обмоток приведена на фиг. 141 схема множественной последовательной равносекционной обмотки, на



Фиг 139. Схема равносекционной простой параллельной обмотки при  $u_s > 1$



Фиг 140 Схема ступенчатой простой параллельной обмотки при  $u_s > 1$



Фиг 141 Схема множественной последовательной равносекционной обмотки при  $u_s > 1$ .

фиг. 142 — ступенчатой; для обеих обмоток  $K = S = 48$ ,  $a = 2$ ,  $u_s = 3$ ,  $p = 2$ ; шаги обмоток указаны на фигурах.

б) Практические схемы обмоток. Для практического осуществления обмотки в мастерских завода нет надобности в только что приведенных полных





условие же третье само собой выполняется, —

$$\frac{2p}{a} = \text{ц. ч.} = 2,$$

и о нем заботиться не приходится. Таким образом, для того чтобы прост параллельная петлевая обмотка была симметричной, необходимо выполнение условий:

$$\left. \begin{array}{l} \text{(I)} \quad \frac{K}{Z} = \text{ц. ч.}, \\ \text{(II)} \quad \frac{Z}{p} = \text{ц. ч.} \end{array} \right\} \quad (233)$$

Так как обыкновенно отношение  $\frac{Z}{p}$  представляет целое число больше 25 то для применяемых на практике значений  $u$ , и  $p$  нетрудно подобрать  $Z$  так чтобы условие (II) выполнялось. Обычно для этого приходится несколько изменить в формуле (198) для э. д. с. заранее выбранный поток  $\Phi$ , причем это изменение получается порядка  $\pm 2\%$ .

При выполнении условий (233) выполняется, как то следует из (229), и условие

$$\frac{K}{a} = \text{ц. ч.},$$

а следовательно, и

$$\frac{K}{p} = \text{ц. ч.}$$

В приведенных в § 95 примерах симметричных петлевых обмоток (фиг. 136, 137) число коллекторных пластин на полюс целое, т. е. получаем не только

$$\frac{K}{p} = \text{ц. ч.},$$

но и

$$\frac{K}{2p} = \text{ц. ч.}$$

Вследствие этого замыкание секций накоротко положительными и отрицательными щетками происходит одновременно, причем в диаметральной обмотке (фиг. 136) обе индуктируемые стороны одной впадины оказываются замкнутыми одновременно, в хордовой же обмотке (фиг. 137) одновременное замыкание накоротко обеих индуктируемых сторон одной впадины не имеет места. Последнее обстоятельство является для коммутации весьма ценным, в особенности, если машина не имеет добавочных полюсов.

Если при выполнении условия  $\frac{K}{p} = \text{ц. ч.}$  мы имеем

$$\frac{K}{2p} \neq \text{ц. ч.},$$

то в то время, когда под серединами щеток одной полярности находятся середины коллекторных пластин, под сердечниками щеток другой полярности лежат изоляционные прослойки. Благодаря этому фазы коммутирования секций щетками разных полярностей оказываются сдвинутыми на половину времени, в течение которого секции находятся в процессе коммутации. Такой случай представлен на фиг. 138, где  $K = S = 22$ ;  $p = 2$ .

Обмотка при этом получается хордовой, но сужение катушки против диаметральной оказывается незначительным (в особенности в тех случаях, когда отношение  $K/p$  достаточно велико); в коммутационном же отношении такая обмотка будет значительно лучше диаметральной (фиг. 136), хотя и хуже хор-

довой, данной на фиг. 137, но последняя дает слишком большое сужение шага и, следовательно, более ощутительное уменьшение генерируемой э. д. с. Ввиду сказанного можно вообще рекомендовать брать  $\frac{K}{p} = \text{ц. ч.}$ , но нечетному, т. е. желательно, чтобы  $\frac{K}{2p} \neq \text{ц. ч.}$

Того обстоятельства, что обмотка симметрична, оказывается для удовлетворительной работы ее недостаточно. Как увидим ниже, простые параллельные обмотки должны всегда снабжаться так называемыми уравнительными соединениями I (первого) рода.

б) Множественные параллельные обмотки зубчатого барабанного якоря. Обмотка делается обычно с правыми петлями. Шаг обмотки по коллектору (184)

$$y_k = \left(\begin{smallmatrix} + \\ - \end{smallmatrix}\right) m.$$

Знак минус взят в скобки по тем же соображениям, как и в п. «а».

Начнем с третьего условия симметрии, в этом случае оно принимает следующий вид:

$$(III) \quad \frac{2p}{a} = \frac{2p}{mp} = \frac{2}{m} = \text{ц. ч.}$$

Отсюда следует, что коэффициент множественности должен быть равен 2:

$$m = 2.$$

Второе условие симметрии тогда дает:

$$(II) \quad \frac{Z}{a} = \frac{Z}{mp} = \frac{Z}{2p} = \text{ц. ч.}$$

При выполнении первого условия:

$$(I) \quad \frac{K}{Z} = u_s, \text{ или } K = Zu_s,$$

получаем:

$$\frac{K}{mp} = \frac{K}{2p} = \text{ц. ч.}$$

Это, очевидно, возможно, если

$$\frac{K}{p} = \text{ц. ч.}$$

и

$$\frac{K}{2} = \frac{K}{m} = \text{ц. ч.}$$

Таким образом получаем, что число коллекторных пластин  $K$  и шаг обмотки  $y_k = m$  должны иметь общий наибольший делитель  $g = m = 2$ . Это значит, что из множественных параллельных обмоток симметричной может быть только двукратно замкнутая обмотка, состоящая из двух простых параллельных обмоток; для осуществления ее должны быть выполнены условия:

$$(I) \quad \frac{K}{Z} = u_s; \quad (II) \quad \frac{Z}{2p} = \text{ц. ч.}; \quad (III) \quad m = 2.$$

Рассмотренная обмотка применяется в сравнительно редких случаях.

Для надлежащей работы множественные параллельные обмотки должны быть снабжены не только уравнительными соединениями первого рода, которые устраиваются в простых параллельных обмотках, но еще и специальными уравнительными соединениями, — равнопотенциальными, или соединениями второго рода (см § 103). При однократно замкнутой множественной обмотке, имеющей коэффициент множественности  $m = 2$ , имеем:

$$\frac{K}{2p} \neq \text{ц. ч.}$$

и, следовательно, обмотка является, с точки зрения основных условий симметрии, несимметричной. Несмотря на это, обмотка эта в последнее время стала находить себе применение, так как практика показала, что машины, снабженные такими обмотками, работают хорошо. В то же время однократно замкнутые обмотки требуют, как увидим в дальнейшем, только уравнительных соединений первого рода, что упрощает выполнение якоря.

97. Обыкновенные симметричные последовательные обмотки зубчатого барабанного якоря

а) Простая последовательная обмотка барабанного зубчатого якоря. Шаг обмотки по коллектору (175):

$$y_k = \frac{K (\overline{+}) 1}{p} .$$

В формуле перед  $K$  взят только один знак плюс, так как минус дает последовательную обмотку с левым обходом, а такие обмотки на практике не применяются, знак плюс перед единицей в числителе взят в скобки, так как он соответствует правой последовательной обмотке, которая дает скрещение концов, идущих к коллектору; знак минус перед единицей дает левую последовательную обмотку, не имеющую скрещений. Необходимо, однако, отметить, что в то время, как в случае параллельных обмоток мы можем отказаться от обмоток, дающих скрещение концов секции, отказ от волновых обмоток, дающих эти скрещения, повлек бы за собой значительные затруднения в осуществлении последовательных обмоток. Причина заключается в том, что формула для шага обмотки  $y_k$  в этом случае имеет более сложный вид и накладывает, как увидим ниже, на соотношения входящих в нее параметров ряд условий.

Ввиду того что для простой последовательной обмотки число пар параллельных ветвей  $a = 1$ , то для нее условия симметрии (II) и (III):

$$\frac{Z}{a} = \text{ц. ч.} \quad \text{и} \quad \frac{2p}{a} = \text{ц. ч.}$$

сами собой выполняются, а поэтому для получения симметричной последовательной обмотки остается лишь выполнить условие (I):

$$\frac{K}{Z} = \text{ц. ч.} = u_s.$$

Подставив его в формулу для  $y_k$ , получим:

$$y_k = \frac{K-1}{p} = \frac{u_s Z - 1}{p} . \tag{234}$$

Так как  $y_k$  должно быть числом целым, то для выполнимости обмотки ( $u_s Z$ ) и  $p$ , а следовательно,  $u_s$  и  $p$ , а также  $Z$  и  $p$  должны быть числа взаимно простые. На основании этих соображений составлена табл. 13.

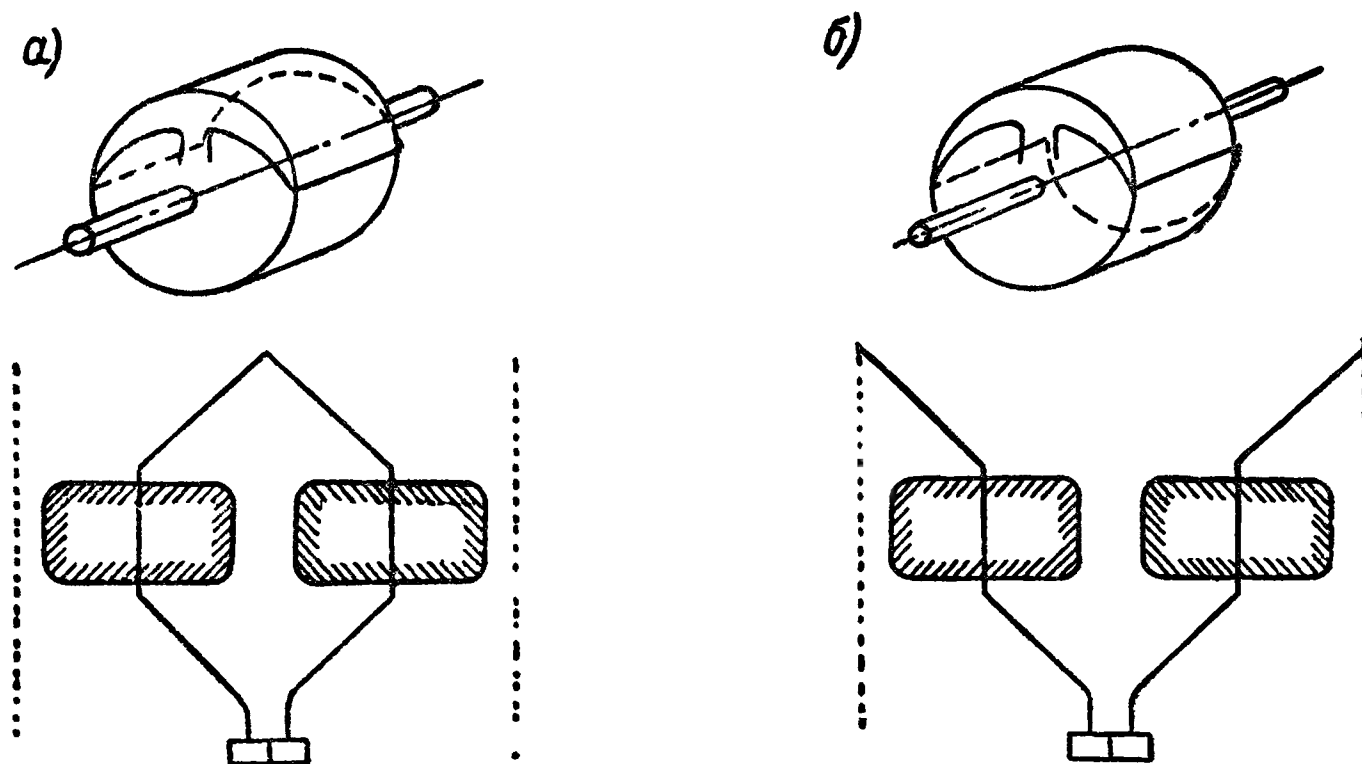
Таблица 13

Значения  $u_s$ , при которых возможно для данного числа пар полюсов  $p$  осуществить симметричную простую последовательную обмотку .

$p$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$u_s$ {	1 — 3 — 5	1 2 — 4 5	1 — 3 — 5	1 2 3 4 —	1 — — — 5	1 2 3 4 5	1 — 3 — 5	1 2 3 — 5	1 — — 4 5	1 2 3 — —	1 2 3 4 5	1 — — — 5	1 — 3 — 5	1 2 — 4 —



Заметим, что (234) при  $p$  четном  $K$  должно быть нечетным, и наоборот. Этим объясняется, почему машины небольшой и средней мощности, конструируемые обычно с  $p = 2$  и снабжаемые простой волновой обмоткой, имеют  $K$  нечетное. Из табл. 13 вместе с тем явствует, что при  $p = 2$  мы очень ограничены в выборе  $u_s$ , а именно: можем взять только нечетное  $u_s$ . Между тем при выборе  $u_s$  приходится учитывать еще ряд других обстоятельств: слишком малое  $u_s$  может повлечь плохое использование впадины, слишком большое  $u_s$  уменьшает число впадин на полюс, что может вредно отразиться на коммутации и породить шум при работе машины.



Фиг. 144. Схемы, иллюстрирующие разницу между петлевой и волновой обмотками двухполюсной машины

Если при данном  $p$  допустимые с точки зрения симметрии обмотки значения  $u_s$  оказываются неподходящими по другим только что перечисленным причинам, то приходится либо применить параллельную обмотку, либо отказаться от симметричной обмотки и применить обмотку несимметричную. По счастью такие несимметричные простые последовательные обмотки в практическом отношении оказались работающими вполне удовлетворительно (см. § 100).

Простая последовательная обмотка явилась в результате стремлений получить для многополюсной машины всего одну пару параллельных ветвей, как в машине двухполюсной с простой параллельной обмоткой. Поэтому применение формулы (234) к двухполюсной машине не имеет смысла, однако является вполне возможным и приводит к обмотке в электрическом отношении совершенно тождественной простой параллельной обмотке, но сохраняющей волновой характер. Разница между петлевой и волновой обмоткой для двухполюсной машины видна из фиг. 144. На фиг. 144, а, соответствующей петлевой обмотке, лобовые соединения секций лежат по одну и ту же сторону от плоскости, проведенной через ось машины; на фиг. 144, б — для волновой обмотки — лобовые соединения лежат с разных сторон от этой плоскости. Изготовление и ремонт волновой обмотки двухполюсной машины сложнее, чем петлевой, поэтому на практике для двухполюсной машины ее не применяют.

**б) Множественная последовательная обмотка зубчатого барабанного якоря. Шаг обмотки по коллектору (187)**

$$y_k = \frac{K(\mp) a}{p}.$$

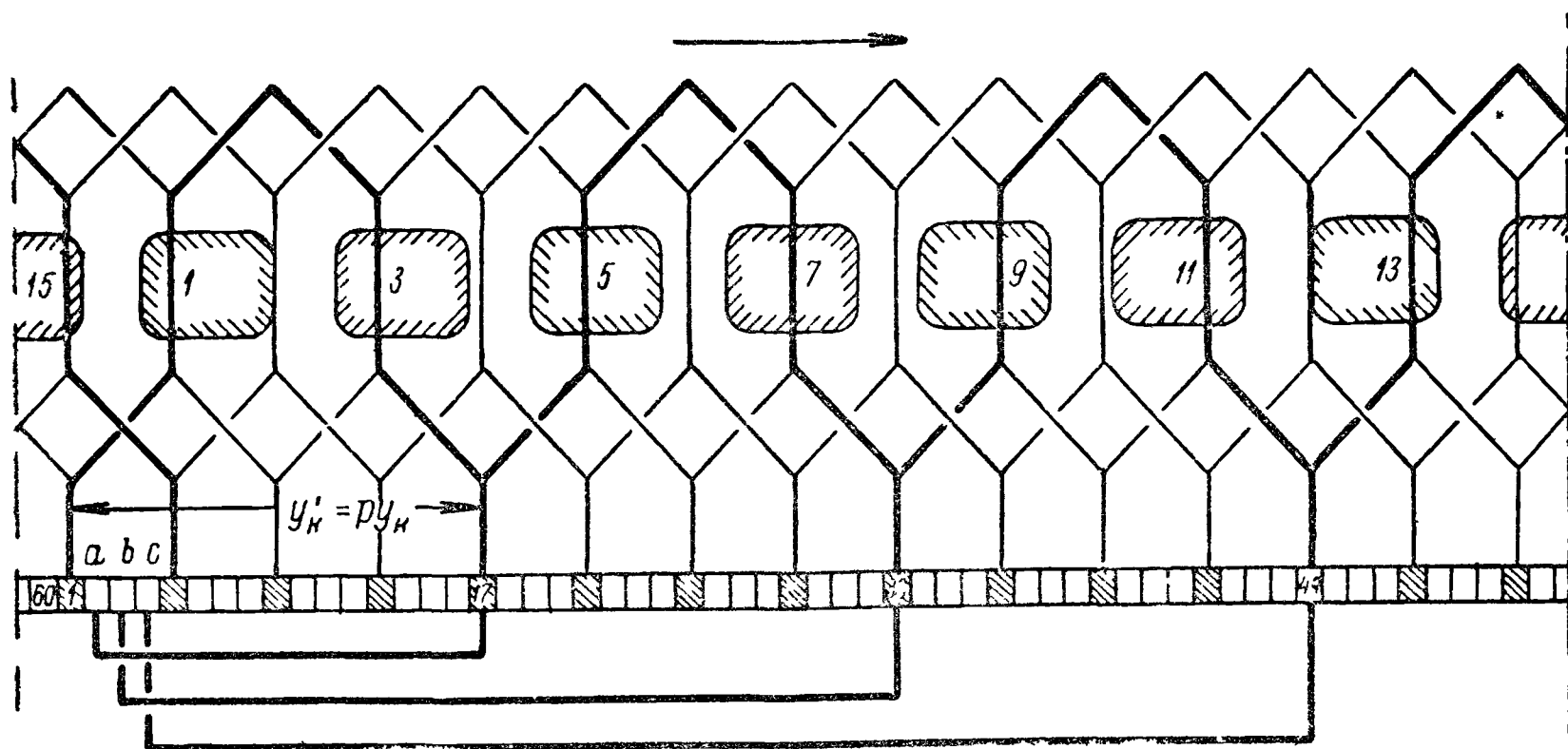
Здесь по тем же соображениям, что и в предыдущем п. «а», перед  $a$  принят знак минус, а знак плюс поставлен в скобки.



Не мешает отметить, что в формуле (237) число  $b$  не может быть произвольным целым числом; в самом деле, если в третье условие симметрии подставить выражение (236), то получим

$$\frac{2p}{a} = \text{ц. ч.} = \frac{2c}{b}.$$

Отсюда следует, что  $b$  может быть равно либо 1, либо 2.



Фиг. 145. Схема последовательной обмотки с увеличенным числом коллекторных пластин

Так как из множественных последовательных обмоток практическое значение имеют лишь такие обмотки, для которых  $a < p$ , то в табл. 14 для каждого из значений  $p$  взяты лишь те значения  $a$ , которые удовлетворяют этому неравенству наряду с удовлетворением третьему условию симметрии ( $\frac{2p}{a} = \text{ц. ч.}$ ). При  $p = 2$ , вследствие этого,  $a$  может быть взято лишь равным 1, но тогда получаем простую последовательную обмотку, рассмотренную выше. Поэтому табл. 14 начинается с  $p = 3$ . Для  $p = 9$  возможно взять, кроме значений  $a = 2$  и  $a = 3$ , еще  $a = 6$ , однако это значение в таблицу не введено, так как по соображениям ширины щеток на практике берут  $a \leq 4$ .

Множественные последовательные обмотки всегда снабжаются уравнительными соединениями второго рода (§ 103)

### 98. Параллельная обмотка зубчатого барабанного якоря с двумя коллекторами

К обмоткам с двумя коллекторами прибегают в следующих случаях: во-первых, когда ток, приходящийся на каждую коммутационную зону, достигает такого значения, что коммутация не может быть безискровой, во-вторых, когда коллектор получается в осевом направлении чрезмерно длинным, в-третьих, когда желательно иметь машину, работающую двигателем с двумя нормальными скоростями; в-четвертых, для получения трехпроводной системы и, наконец, в-пятых, для машин на очень высокие напряжения.

Такую обмотку обычно делают параллельной. Якорь снабжают двумя совершенно тождественными независимыми симметричными обмотками и вместо того, чтобы коллекторные пластины одной вдвигать между таковыми другой, снабжают каждую обмотку особым коллектором, располагая их по обеим сторонам якоря. Можно снабдить якорь и одной только обмоткой с двумя коллекторами, но практически такая конструкция нецелесообразна, так как при этом почти невозможно добиться равномерного распределения тока между двумя коллекторами.

## 99. Симметричные последовательные обмотки зубчатого барабанного якоря с увеличенным либо с уменьшенным числом коллекторных пластин

а) С увеличенным числом коллекторных пластин. Как мы видели в симметричной простой последовательной обмотке кольцевого якоря, каждая щетка, перекрывая изоляционную прослойку между двумя смежными коллекторными пластинами, замыкает накоротко  $p$  последовательно соединенных проводников. В барабанном якоре, удваивающем против кольцевого якоря число активных проводников, каждая щетка замыкает  $p$  секций. Вследствие этого напряжение между смежными коллекторными пластинами барабанной обмотки может оказаться чересчур большим, если даже каждая секция состоит только из одного витка ( $w_s = 1$ ). Напряжение между смежными коллекторными пластинами можно уменьшить, если увеличить число параллельных ветвей обмотки, т. е. взять вместо простой последовательной обмотки множественную. Однако при значительном напряжении машины  $E_N$  и небольшой мощности это приводит часто к слишком тонким проводникам. Кроме того, в машинах на высокие напряжения желательно уменьшить число секций чтобы иметь достаточно места для изоляции и уменьшить стоимость изготовления машины.

Того же результата можно достигнуть без увеличения числа секций, если увеличить число коллекторных пластин. Добавляемые пластины вдвигают между каждыми двумя старыми пластинами и связывают с точками обмотки, потенциал которых лежит между потенциалами пластин, первоначально бывших смежными. Осуществление этой идеи видно из фиг. 145, где между пластинами  $K$ -й и  $(K - 1)$ -й вдвинуты еще три пластины, соединенные внутри коллектора с пластинами, которые в первоначальном коллекторе отстояли друг от друга на  $y_k$ . Благодаря этому увеличению числа коллекторных пластин и внутренним соединениям, в новом коллекторе между любыми двумя смежными пластинами находится еще одна секция. Пластины, номера которых отличались раньше на 1, теперь отстоят друг от друга на  $p$  коллекторных делений, поэтому шаг по коллектору теперь выразится через старый шаг  $y_k$  следующей формулой

$$y_k' = py_k,$$

в то время как во всех прочих отношениях обмотка останется без изменений.

Мы произвели максимально возможное увеличение числа коллекторных пластин:

$$K' = pK,$$

если в таком большом увеличении надобности нет, то можно ограничиться вдвиганием между каждыми двумя старыми пластинами меньшего числа добавочных пластин, но с соблюдением условия, чтобы вдвигаемые пластины можно было соединить с точками обмотки, делящими разность напряжений между двумя первоначально бывшими смежными пластинами на равные части. Иными словами, если производить увеличение числа коллекторных пластин не в  $p$  раз, а всего в  $p_1$  раз, то должно существовать равенство:

$$\frac{p}{p_1} = \text{ц. ч.}$$

В примере, приведенном на фиг. 145, мы могли бы, например, ограничиться вдвиганием между двумя старыми пластинами только одной, помеченной буквой  $b$ , тогда число секций между двумя пластинами нового коллектора будет равно  $\frac{p}{2}$ , для шага же по коллектору получим.

$$y_k' = 2y_k,$$

а число пластин нового коллектора будет  $K' = 2K$ .





преобразуется так.

$$y_s = 2(y_{s1} + y_{s2}) = 2y_k' = 2y_k.$$

Для  $y_k'$  получим формулу

$$y_k' = \frac{2K' - 1}{p}.$$

## В. НЕСИММЕТРИЧНЫЕ ОБМОТКИ ЗУБЧАТОГО БАРАБАННОГО ЯКОРЯ

### 100. Несимметричные последовательные обмотки с мертвыми секциями

Как явствует из табл. 13 (§ 97), при расчете симметричной простой последовательной обмотки четырехполюсной машины ( $p = 2$ ) можно для  $u_s$  брать лишь два значения:  $u_s = 1$  или  $u_s = 3$ ; это ограничение в выборе  $u_s$  весьма затрудняет расчет машин небольшой и средней мощности, так как для них наиболее подходящими являются четырехполюсная конструкция магнитно системы и простая последовательная обмотка, а выбор  $u_s$  не является, к сожалению, совершенно произвольным. Слишком малое  $u_s$  влечет плохое использование впадины, слишком большое  $u_s$  сказывается неблагоприятно на коммутации, так как уменьшает число впадин  $Z$  и дает чрезмерно широкую зону коммутации. Если для наиболее подходящих значений  $u_s$  и  $p$  симметричная простая волновая обмотка не осуществима, то приходится либо перейти к параллельной обмотке, либо, сохранив  $p$  и  $u_s$ , отказаться от симметричной последовательной обмотки и заменить ее несимметричной.

Несимметричную последовательную обмотку мы получим тогда, когда некоторые секции ее оставим свободными, не связанными с прочими, составляющими одну замкнутую цепь. Такая обмотка может быть названа несимметричной последовательной обмоткой с наличием мертвых секций.

В ней, очевидно,

$$\frac{K}{Z} \neq \text{ц ч}$$

К указанной обмотке приходится прибегать и в том случае, когда мы связаны определенным заданным числом элементарных впадин, не совместимым с формулой для  $y_k$ .

Так, мы видели, что если  $p$  четное, то  $K$  должно быть нечетное, и наоборот. Предположим, что имеем готовый якорь с  $Z = 24$ ,  $p = 2$ , и его нужно снабдить последовательной обмоткой, имеющей  $u_s = 1$ . Из этих данных следует, что число секций на якоре будет равно 24. Выполнить обмотку с  $K = 24$  мы не можем, так как тогда для  $y_s$  не получается целого значения. Чтобы осуществить обмотку, приходится одну из секций, например, лежащую в 24 и 5 впадинах, оставить свободной (на фиг. 147 она вычерчена жирно). Тогда число секций, входящих в обмотку, а следовательно, и число коллекторных пластин равно 23.

$$S = K = 23.$$

Для этого  $K$  получаем

$$y_s = y_k = \frac{23 - 1}{2} = 11$$

Взяв  $y_{s1} = 5$ ,  $y_{s2} = 6$ , мы получим обмотку, представленную на фиг. 147, если при осуществлении шага  $y_s$  будем два промежутка между впадинами 23—24 и 24—1 считать за один. Если же останемся при обычном способе измерения шагов, учитывая все промежутки между элементарными впадинами (в данном случае, благодаря равенству  $u_s = 1$ , это идентично с реальными впадинами), то нам придется после каждых  $(p - 1)$  шагов, равных

$$y_s = \frac{K - 1}{p} = \frac{23 - 1}{2} = 11,$$

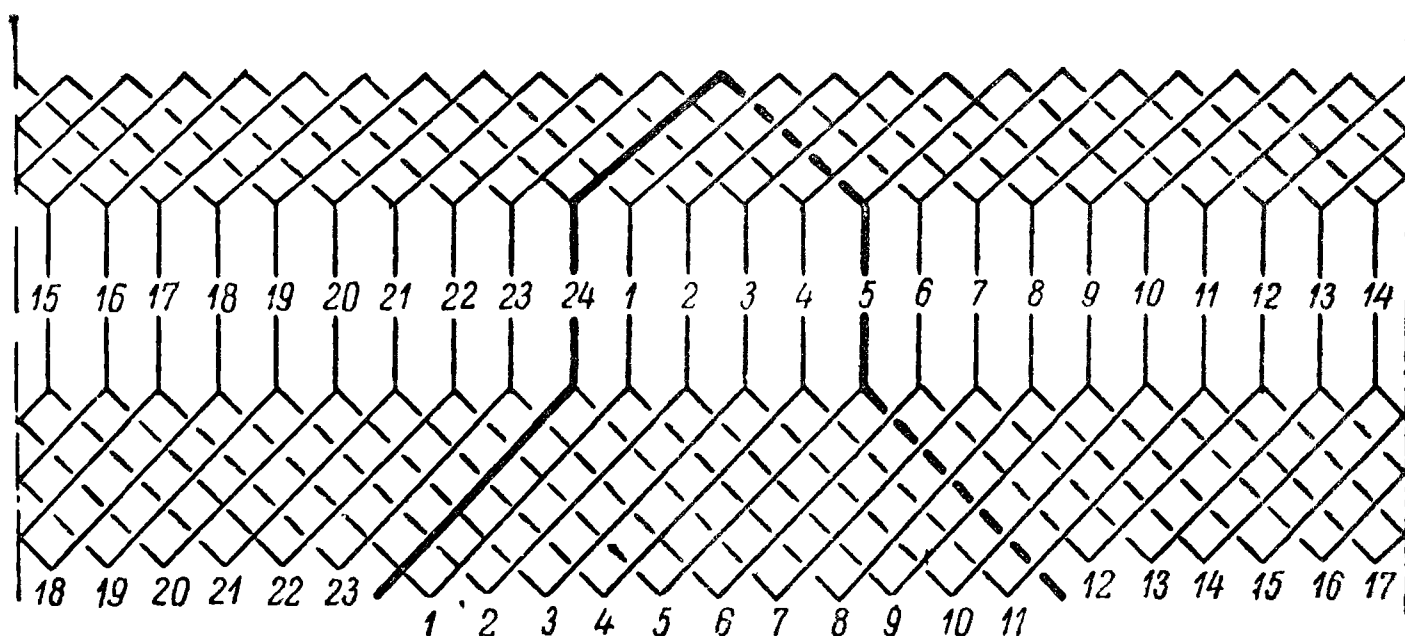
делать один шаг

$$y_s' = \frac{K-1}{p} + 1 = 11 + 1 = 12.$$

Этим результирующим шагам соответствуют вторые частичные шаги:

$$y_{s2} = y_s - y_{s1} \quad \text{и} \quad y_{s2}' = y_s' - y_{s1} = y_s - y_{s1}' + 1$$

В большинстве практических случаев эта разница столь незначительна, что все концы соединяемых секций могут быть сделаны совершенно одинаковой длины, при этом наклоны сторон секций, отстоящих на  $y_{s2}'$ , будут несколько отличаться от наклона прочих. На фиг 147 этот наклон сохранен умышленно одинаковым для всех секций, чтобы рельефнее оттенить, что не все шаги  $y_{s2}$  одинаковы.



Фиг. 147. Схема волновой обмотки с мертвой секцией при  $u_s = 1$ .

В рассмотренной обмотке э д с, индуктируемые в каждой из двух ее параллельных ветвей, будут, очевидно, неодинаковы, что при холостом ходе машины вызовет появление в обмотке уравнительного тока. В машинах небольшой мощности этот уравнительный ток сравнительно невелик и обычно не создает никаких осложнений процесса коммутации, в машинах же большой мощности ток может достигнуть значительной величины, а потому рекомендуется, прежде чем применять обмотку с мертвыми секциями к такой машине, произвести вычисление уравнительного тока. Такое вычисление нетрудно сделать на основании рассмотрения соответствующего потенциального многоугольника

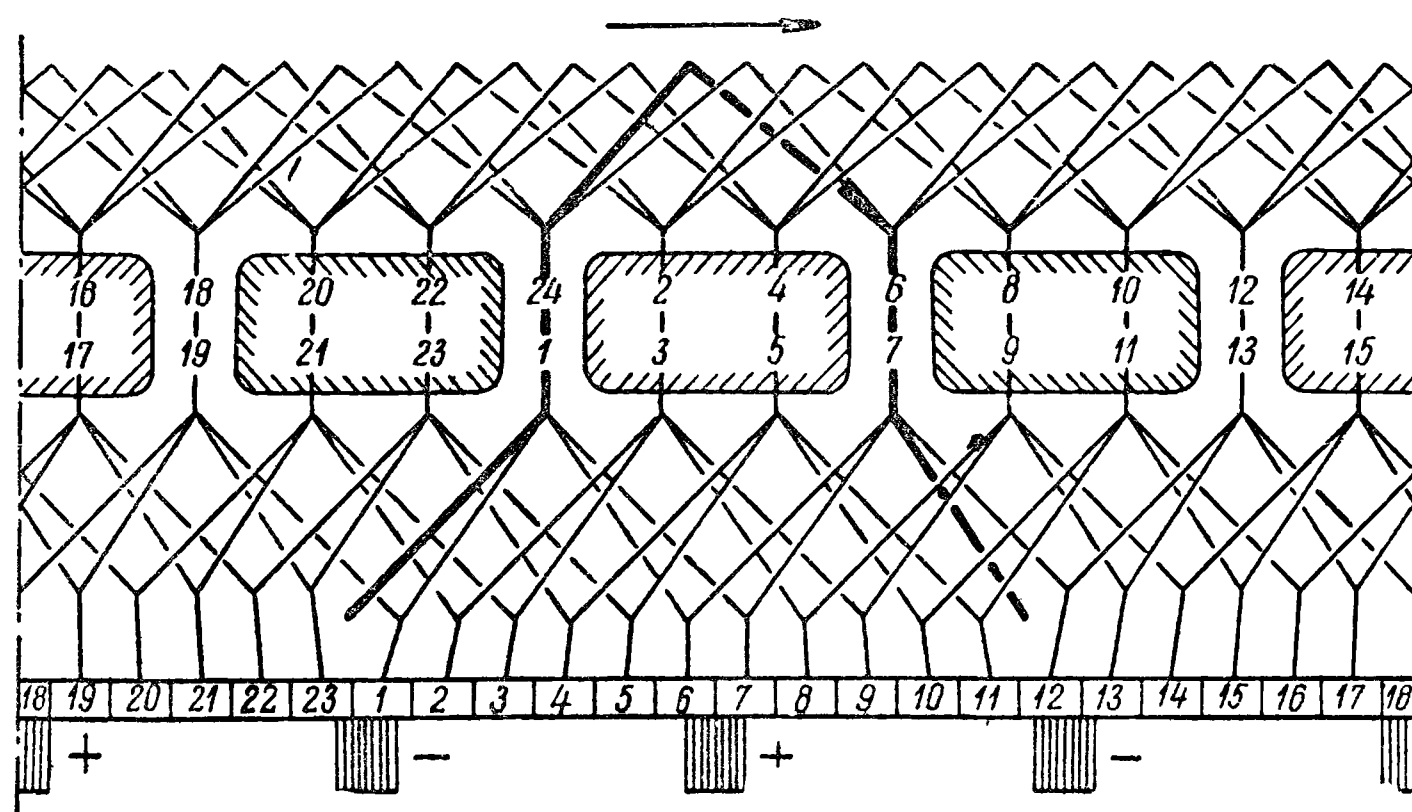
В качестве примера волновой обмотки с мертвыми секциями на фиг 147 взята обмотка с  $u_s = 1$ , сделано это с целью придания фигуре большей наглядности. Указанный выше способ расчета такой обмотки несколько не изменится, если мы возьмем  $u_s > 1$ . В этом легко убедиться, рассматривая фиг 148, на которой приведена подобная обмотка с  $u_s = 2$ ; мертвая секция нанесена на фигуре жирной чертой.

Так как индуктируемые стороны обмотки, лежащие в верхнем и нижнем лоях одной и той же элементной впадины, принадлежат двум различным ветвям обмотки, то мы могли бы сделать волновую обмотку с мертвыми стержнями симметричной, если бы при составлении ее выпустили две индуктируемые стороны одной и той же элементной впадины. Такую обмотку, однако, нельзя было бы сделать шаблонной, а это настолько удорожает работу, что указанная идея на практике применения не находит

Если бы мы пожелали сделать простую последовательную обмотку для машины, имеющей  $p = 5$  и  $S = 83$ , то нам пришлось бы устроить ее с двумя мертвыми секциями, взяв при осуществлении обмотки  $K = S - 2 = 81$ , получаем, что шаг по коллектору.

$$y_k = \frac{K-1}{p} = \frac{81-1}{5} = 16.$$

В простой последовательной обмотке с несколькими мертвыми секциями необходимо эти секции располагать на окружности якоря таким образом, чтобы получить возможно малую разницу в э. д. с. обеих ветвей, но, с другой стороны, необходимо стремиться к тому, чтобы разница в результирующих шагах не получилась чересчур большой. Рекомендуется, с целью избежания слишком большого сдвига с нейтрали секций, замыкаемых при коммутации накоротко, располагать мертвые секции друг от друга на таком расстоянии, чтобы наибольшая разность между результирующими шагами не была больше одного деления якоря. Эти обмотки на практике не получили распространения, а потому на них более подробно не останавливаемся.



Фиг. 148 Схема волновой обмотки с мертвой секцией при  $u_s = 2$

Накладывая на якорь ряд простых последовательных обмоток, имеющих каждая по одной мертвой секции, получаем соответствующую множественную последовательную многократно замкнутую обмотку. В такой обмотке будет, очевидно,  $a$  мертвых секций, симметрично распределяющихся между  $a$  парами параллельных ветвей обмотки. Обмотка снабжается при этом соответствующими уравнительными соединениями (второго рода).

#### 101. Несимметричная искусственно замкнутая последовательная обмотка

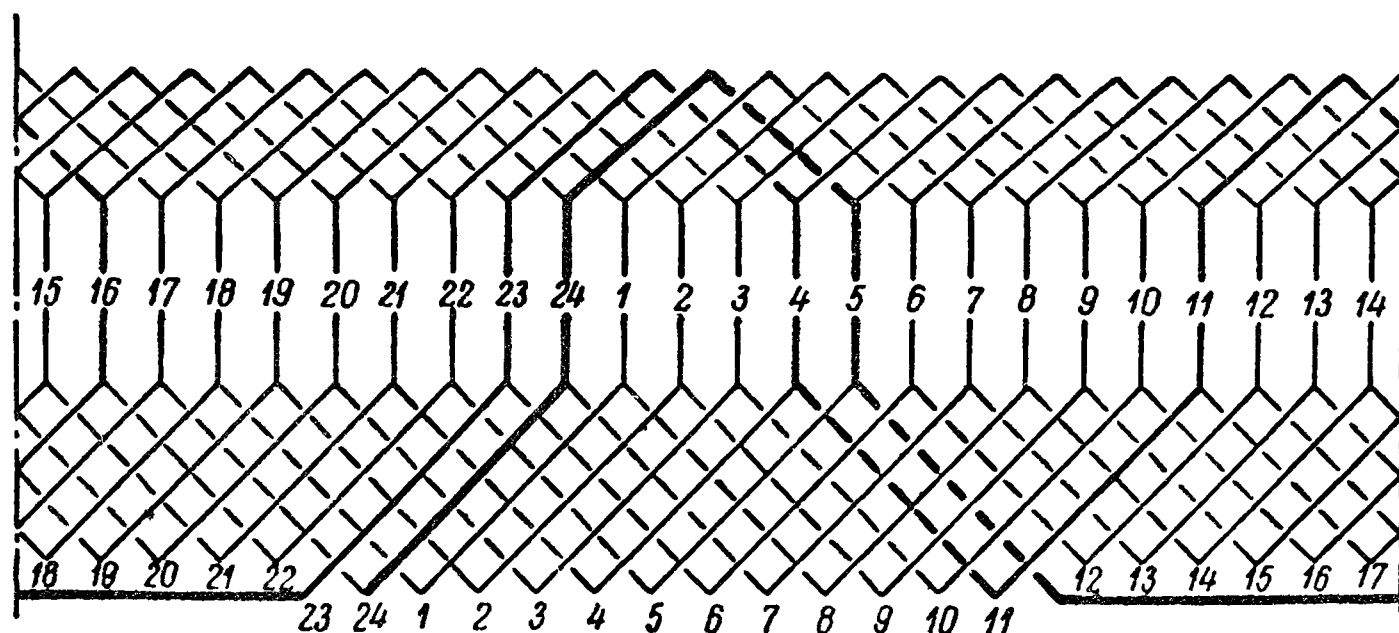
Такую обмотку можно получить из только что рассмотренной несимметричной последовательной обмотки с наличием мертвой секции, если ее разрезать в надлежащем месте и в разрезанное место включить мертвую секцию. Место для разреза обмотки не может быть выбрано произвольно, так как необходимо, чтобы включаемая секция лежала между идущими друг за другом обходами якоря. Для выполнения этого требования обмотку следует разрезать в тобовом соединении, лежащем рядом с началом мертвой секции, при этом, если обмотка левая, то лежащем по левую сторону от начала мертвой секции. Так, на фиг. 149 для устройства искусственного замыкания обмотки необходимо разрезать ее в точке 23 и соединить концы секции 12—17 с началом мертвой секции 24—5, а начало секции 23—4 с концом мертвой секции 24—5, как это и представлено на фигуре.

На фиг. 150 приведена искусственно замкнутая последовательная обмотка с  $u_s > 1$ , а именно с  $u_s = 2$ . Схема обмотки вычерчена вместе с коллекторными пластинами, причем показано как расположение полюсов, так и щеток.

В искусственно замкнутой последовательной обмотке э. д. с. обеих параллельных ветвей взаимно уравнивают друг друга, а потому здесь нет причины для появления в обмотке уравнительного тока. С этой точки зрения искусственно замкнутая обмотка имеет перед волновой обмоткой с мертвыми сек-

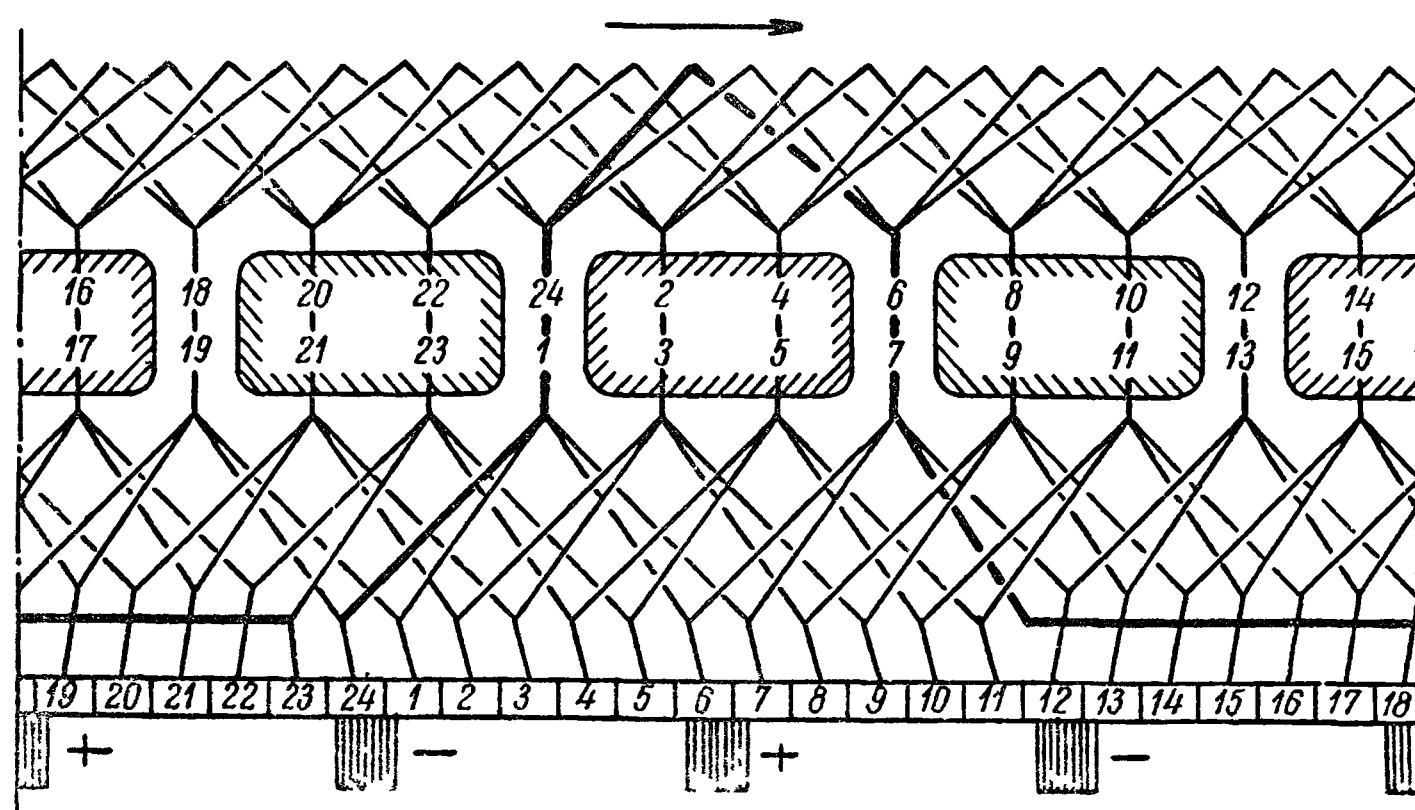


циями определенное преимущество, но зато в ней имеется другой недостаток, которого нет в той обмотке. В самом деле, если на коллекторе машины с искусственно замкнутой обмоткой взять только две щетки (т. е. два комплекта щеток), то в момент, когда под щеткой окажутся пластины 23 и 24, мы получим только одну короткозамкнутую секцию, при нахождении же под щеткою лю-



Фиг. 149. Искусственно замкнутая последовательная обмотка при  $u_s = 1$

бых двух других смежных пластин в процессе коммутации будет  $p$  последовательно соединенных секций. В обмотке с мертвыми секциями такого неравенства нет, там всегда щетка замыкает накоротко  $p$  последовательно соединенных секций. Необходимо, однако, напомнить, что обычно на коллекторе



Фиг. 150. Искусственно замкнутая последовательная обмотка при  $u_s = 2$

ставят полное число щеток ( $2p$ ), а тогда каждая из  $p$  секций, замыкаемых накоротко в последовательном соединении, замыкается накоротко сама по себе. Вследствие этого указанный недостаток искусственно замкнутой обмотки практически имеет небольшое значение

Заметим, кстати, что искусственно замкнутую последовательную обмотку, приведенную на фиг. 149, можно мыслить себе полученной из симметричной простой последовательной обмотки с  $K = 25$  путем выбрасывания секции 25 и равномерного распределения по окружности якоря остальных секций. Обмотка тогда окажется разомкнутой, причем для замыкания ее придется сделать искусственное соединение взамен выброшенной секции.

Для образования искусственно замкнутой обмотки можно поэтому вывести такое правило, если через  $K'$  обозначить число коллекторных пластин на 1 большее, чем данное число пластин  $K$ :

$$K' = K + 1.$$

Вычисляем результирующий шаг по секциям и коллектору:

$$y_s = y_k = \frac{K' - 1}{p}$$

и соответствующие частичные шаги  $y_{s1}$  и  $y_{s2}$ . Осуществление обмотки начинаем с любой секции, причем каждый раз, сделав  $p - 1$  результирующих шагов, равных  $y_s$ , делаем один шаг, равный  $y_s \pm 1$  (т. е. укорачиваем или удлиняем каждый  $p$ -й шаг на единицу). После одного обхода по коллектору мы прдвигаемся вперед или назад на

$$(p - 1) \frac{K' - 1}{p} + \frac{K' - 1}{p} \pm 1 = (p - 1) \frac{K}{p} + \frac{K}{p} \pm 1 = K \pm 1,$$

т. е. на одно коллекторное деление. После обхода всех секций обмотка оказывается еще не замкнутой, замыкание производим ранее описанным способом.

Искусственно замкнутая обмотка может быть сделана и множественной последовательной. Для осуществления ее получаем следующую формулу

$$(p - a) \frac{K' - 1}{p} + a \left( \frac{K' - 1}{p} \pm 1 \right) = K \pm a$$

Обмотка может быть сделана однократно и  $a$ -кратно замкнутой, осуществляется она обычно с уравнительными соединениями.

#### Г. УРАВНИТЕЛЬНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ В ЗАМКНУТЫХ ОБМОТКАХ ЗУБЧАТЫХ БАРАБАНЫХ ЯКОРЕЙ

##### 102. Уравнительные соединения в простых параллельных обмотках

а) Причины, которые могут нарушить правильность работы простой параллельной обмотки многополюсной машины. В простой параллельной обмотке кольцевого якоря каждая отдельная ветвь целиком помещается под одним определенным полюсом. В случае, если обмотка вполне симметрична и выполнение машины совершенно безупречно, во всех ветвях обмотки будут индуцироваться равные по величине э. д. с. Тогда при холостом ходе в обмотке не будет никаких внутренних токов, а при нагрузке по всем ветвям обмотки будут протекать одинаковые токи, определяемые выражением.  $i_a = I_a / 2a$ , где  $I_a$  — полный ток якоря.

Практически, однако, во всякой готовой машине всегда имеются некоторые неточности как в выполнении полюсов, так и в проводимости отдельных полюсных сердечников<sup>1</sup>. И то и другое влечет за собой нарушение равенства токов отдельных полюсов, а следовательно, и э. д. с. отдельных ветвей. В результате, в обмотке машины, идущей вхолостую, потенциалы одноименных щеток оказываются неравными, в ветвях обмотки появляются токи, определяемые разностью этих потенциалов и замыкающиеся по проводам, которыми соединяются одноименные щетки; при нагрузке же машины происходит неравномерное распределение внешнего тока  $I_a$  между ветвями обмотки, которое влечет за собой неравномерный нагрев обмотки, перегрузку щеток и нарушение правильности процесса коммутации.

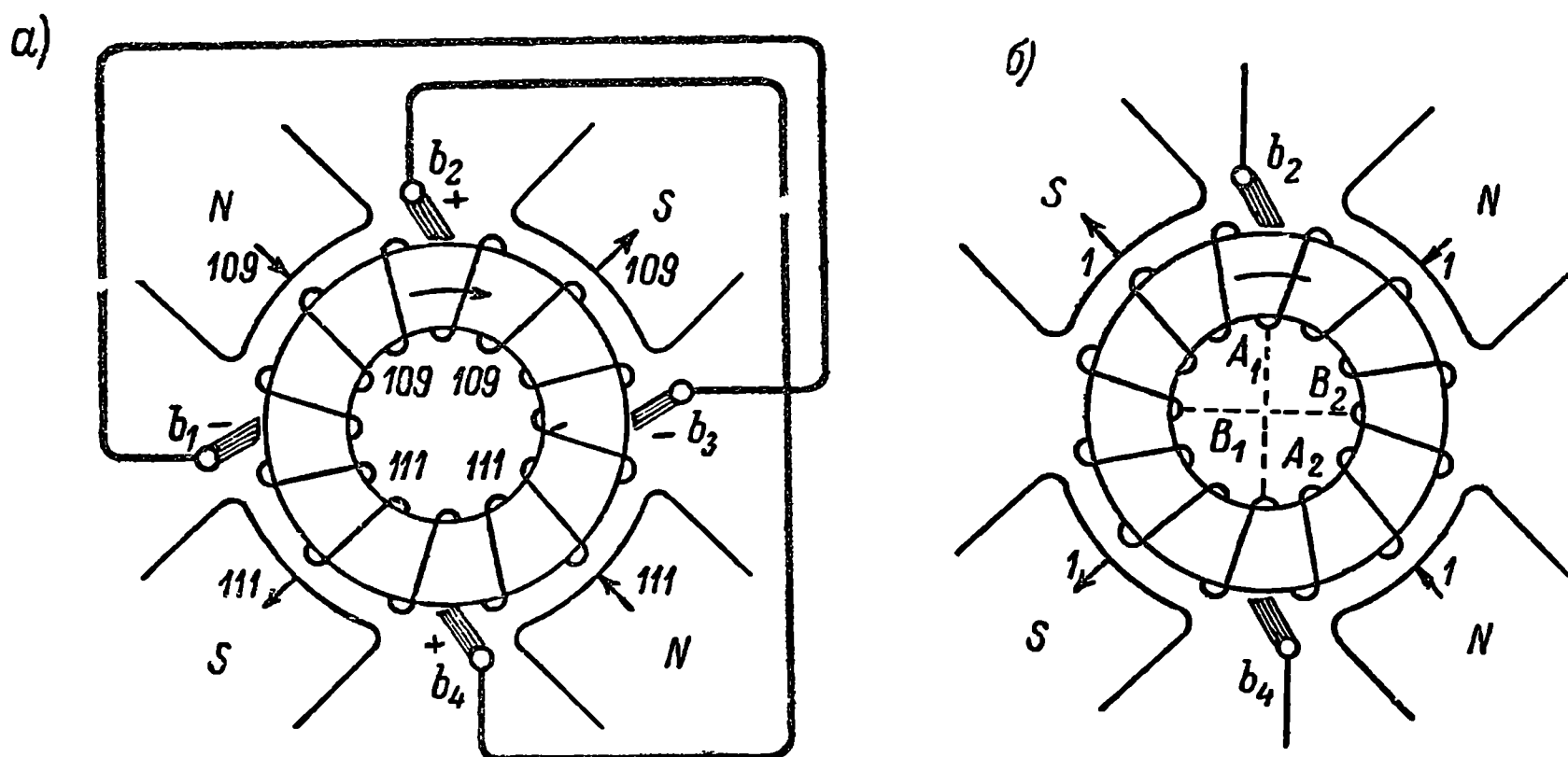
В простых параллельных обмотках барабанных якорей каждая ветвь обмотки лежит не под одним, а под двумя смежными полюсами. Это обстоятельство может в некоторой степени ослабить отмеченные несовершенства в работе отдельных ветвей обмотки, но, конечно, не в состоянии их парализовать.

Необходимо заметить, что даже в том случае, если бы нам удалось при изготовлении машины добиться вполне одинаковых условий для всех ветвей

<sup>1</sup> Неравенство в магнитных проводимостях отдельных полюсов сердечников может появиться вследствие образования при их отливке внутренних раковин. Во избежание этого ныне прибегают к устройству сердечников полюсов из листового железа, на что уже указывалось выше.

ее обмотки, то с течением времени в работе такой машины появилось бы неизбежное расстройство, как следствие снашивания подшипниковых вкладышей, изменяющего величину воздушного зазора под отдельными полюсами.

Как на причину, которая может повлечь за собой неравномерное распределение тока  $I_a$  между ветвями обмотки, следует указать еще на возможное неравенство сопротивлений отдельных ветвей, особенно в машинах средней и больших мощностей, в которых оно измеряется сотыми и тысячными долями ома. Тщательность изготовления отдельных секций обмотки и спаев секций



Фиг 151 Схема четырехполюсной машины с кольцевым якорем и неодинаковыми потоками полюсов

между собою и коллектором имеет поэтому весьма большое значение. В этом смысле возможность изготовлять секции для зубчатых якорей на специальных шаблонах является обстоятельством весьма благоприятным.

б) Цель уравнительных соединений в простых параллельных обмотках. Как мы видели, в симметричной обмотке максимальное возможное число групп равнопотенциальных точек (169)

$$n_p = \frac{K}{a}.$$

Эти точки являются действительно равнопотенциальными только при отсутствии вышеотмеченных несовершенств в конструкции машины. В этом случае, весьма редком на практике, — соединение равнопотенциальных точек при помощи соответствующих проводников, т. е. устройство в обмотке уравнительных соединений (§ 94), никакого влияния на ее работу оказать не может, так как по этим соединениям никакие токи протекать не будут. Но как только появятся причины, нарушающие тождество э. д. с. отдельных ветвей обмотки, так сейчас же теоретически равнопотенциальные точки обмотки перестанут быть таковыми и за счет разности в их потенциалах по уравнительным соединениям и ветвям обмотки начнут циркулировать токи. Разность напряжений между теоретически равнопотенциальными точками будет в этом случае иметь переменный характер, а поэтому и уравнительные токи будут токами переменными. Эти токи создают соответствующую магнитодвижущую силу, которая, слагаясь с м. д. с. полюсов, произведет выравнивание потоков отдельных полюсов и восстановит равномерное распределение внешней нагрузки между всеми параллельными ветвями обмотки.

Для более подробного выяснения роли уравнительных соединений в простой параллельной обмотке рассмотрим 4-полюсную машину с кольцевым якорем, представленную на фиг. 151, а. Предположим, что машина должна давать 110 в и что вследствие неодинакового междужелезного пространства в ветвях обмотки  $b_1b_2$  и  $b_2b_3$  индуктируется всего 109 в, а в ветвях  $b_3b_4$  и  $b_4b_1$

по 111 в. Так как  $109 = 110 - 1$ ,  $111 = 110 + 1$ , а э. д. с. пропорциональны создающим их потокам, то мы можем представить себе явление так, как будто под всеми полюсами проходят совершенно тождественные потоки  $\Phi_{110}$ , генерирующие во всех ветвях одинаковые э. д. с., равные 110 в, и потоки  $\Phi_1$ , генерирующие в ветвях обмотки  $b_1b_2$  и  $b_2b_3$  э. д. с., равные 1 в и направленные навстречу э. д. с. от потока  $\Phi_{110}$ , а в ветвях  $b_3b_4$  и  $b_4b_1$  — э. д. с., также равные 1 в, но направленные согласно с э. д. с. от потока  $\Phi_{110}$ . Для этого добавленный поток  $\Phi_1$  должен проходить по магнитной системе так, как указано на фиг. 151, б. Из фигуры явствует, что по отношению к этому потоку машина является двухполюсной, причем щетка  $b_2$  будет отрицательной, а щетка  $b_4$  — положительной.

Предположим, что в машине осуществлены соединения точек обмотки  $A_1A_2$  и  $B_1B_2$ , расположенных по двум взаимно перпендикулярным диаметрам. В отношении потока  $\Phi_{110}$  (четырёхполюсная машина) соединенные точки являются равнопотенциальными, в отношении же потока  $\Phi_1$  (двухполюсная машина) в момент, указанный на фиг. 151, между точками  $A_1$  и  $A_2$  мы имеем максимальное напряжение, а между точками  $B_1$  и  $B_2$  напряжение, равное нулю. При вращении якоря по стрелке напряжение между точками  $A_1$  и  $A_2$  будет постепенно уменьшаться, а между точками  $B_1$  и  $B_2$  возрастать. Через  $1/4$  поворота диаметр  $\overline{B_1B_2}$  совпадет с нейтралью двухполюсной машины, а диаметр  $\overline{A_1A_2}$  станет к ней перпендикулярным и т. д. Под влиянием переменных напряжений, действующих между точками  $A_1$  и  $A_2$ , а также  $B_1$  и  $B_2$  в проводниках, соединяющих эти точки, пойдет переменный ток. Ток этот будет проходить также и по обмотке якоря. Переменный ток создает поток якоря. В теории машин переменного тока доказывается, что при данных условиях поток якоря по отношению к потоку  $\Phi_1$  будет неподвижным и направлен почти навстречу ему. Вследствие этого поток  $\Phi_1$  будет почти целиком потушен, а тогда в ветвях данной четырехполюсной машины наступит почти полное восстановление нарушенного равенства индуктированных э. д. с.

Уравнительные соединения, устраиваемые в простых параллельных обмотках с целью выравнивания потоков отдельных полюсов, в дальнейшем, ради краткости, будем называть **уравнительными соединениями первого рода**.

в) **Выбор числа групп уравнительных соединений в простых параллельных обмотках.** Свою роль уравнительные соединения будут выполнять тем совершеннее, чем больше их мы осуществим, а потому, теоретически, надлежало бы делать полное ( $n_p = K/p$ ) число возможных соединений. К этому прибегают, однако, только в машинах с особо трудными коммутационными условиями. При устройстве полного числа групп уравнительных соединений, распределение внешнего тока машины между всеми параллельными ветвями обмотки получается совершенно равномерным, но распределение тока между щетками, стоящими в одноименных коммутационных зонах, становится селективным и всецело определяется переходными сопротивлениями щеток. Таким образом, симметричная параллельная обмотка, снабженная полным числом уравнительных соединений, теряет свое характерное свойство — принудительное распределение внешнего тока между всеми коммутационными зонами. Это является, разумеется, недостатком, но с ним приходится мириться из-за того громадного значения, какое в коммутационном отношении имеет вышеотмеченная равномерность распределения между всеми параллельными ветвями обмотки внешнего тока машины.

В обычных машинах выполнение полного числа уравнительных соединений повело бы к удорожанию машины, да и по конструктивным условиям не всегда оказалось бы возможным. Но в этом нет надобности. Опыт показывает, что обычные машины работают вполне удовлетворительно и тогда, когда осуществлена лишь часть возможных групп равнопотенциальных соединений.



При нарушении величины зазора под отдельными полюсами, вследствие снашивания подшинниковых вкладышей, происходит не только нарушение равенства потоков отдельных полюсов, но и нарушение правильности распределения магнитной индукции под полюсными башмаками. При достаточном числе уравнительных соединений получается восстановление не только равенства потоков, но и одинакового распределения индукции. В машинах с петлевыми обмотками при диаметре якоря от 10 см и до 40—50 см количество  $N_v$  уравнительных колец, к которым присоединяются равнопотенциальные точки обмотки, принимается в пределах

$$N_v \approx (0,1 \div 0,5) \frac{K}{p}.$$

В крупных машинах с петлевыми обмотками применяют, по возможности, полное количество уравнительных колец, т е

$$N_v = \frac{K}{p}.$$

Уравнительные соединения оказывают благоприятное влияние и на тушение высших гармоник от зубцов якоря и пульсаций потока в коммутационных зонах. Для выполнения этой последней роли без оказания влияния на основное поле необходимо, чтобы на дугу окружности, заключенную между концами смежных полюсных башмаков, приходилось не менее двух уравнительных соединений.

При осуществлении неполного числа уравнительных соединений не всегда удастся достигнуть полной симметрии в их размещении, но всегда следует стремиться к тому, чтобы эта несимметрия была сведена до минимума.

### 103. Уравнительные соединения в множественных последовательных обмотках

а) **Нечувствительность последовательных обмоток к недочетам в выполнении магнитной системы.** В простой последовательной обмотке кольцевого якоря мы имеем всего две параллельные ветви. Проводники одной ветви расположены под всеми северными, проводники другой — под всеми южными полюсами машины. Так как сумма магнитных линий, входящих в якорь, должна равняться сумме магнитных линий, выходящих из якоря, то при достаточном числе проводников на якоре обе ветви, с точки зрения индуктируемых в них э д с , будут вполне эквивалентны, и все несовершенства в конструкции магнитной системы на работу простой последовательной обмотки кольцевого якоря никакого влияния не оказывают. В простой последовательной обмотке барабанного якоря дело обстоит еще благополучнее, так как в ней каждая из двух параллельных ветвей имеет проводники, расположенные под всеми северными и под всеми южными полюсами.

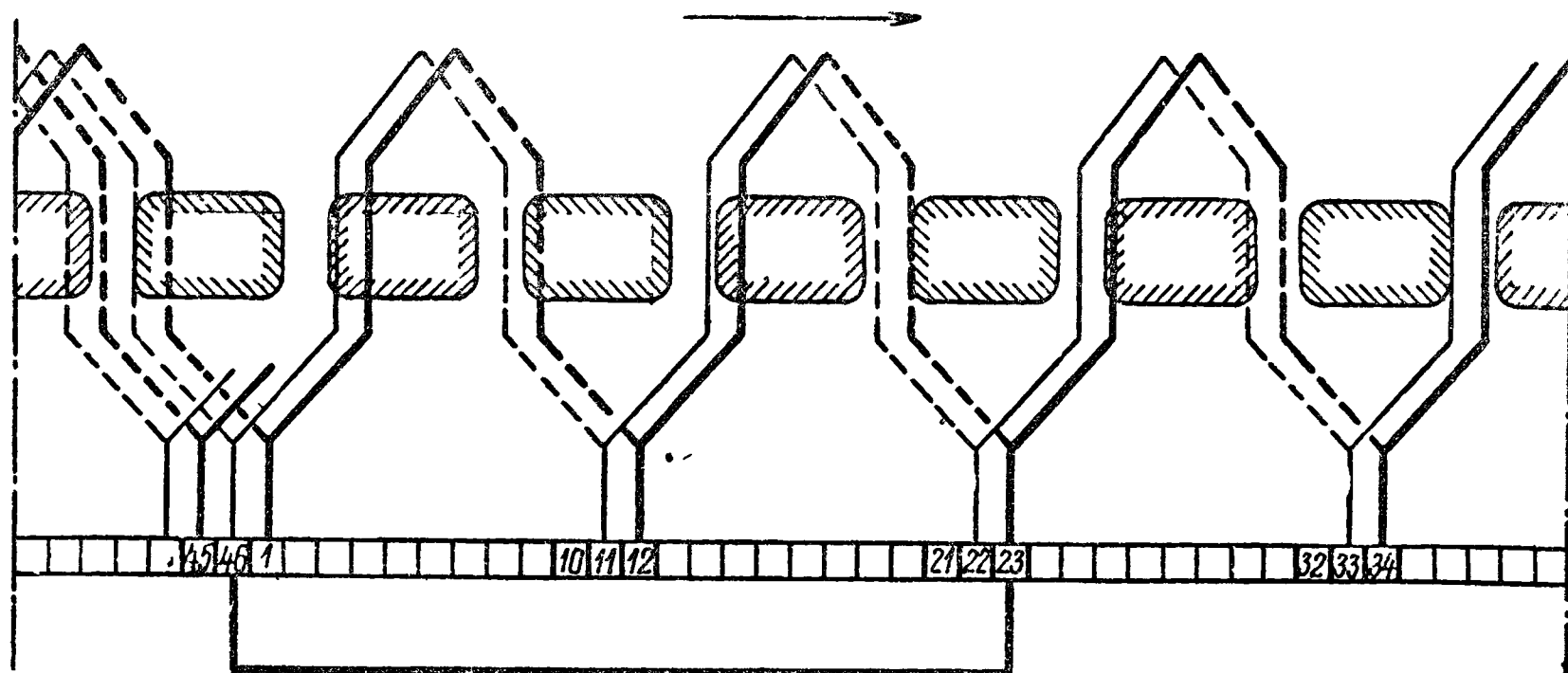
Таким образом, простая последовательная обмотка ни в каких уравнительных соединениях не нуждается, — обстоятельство весьма ценное, так как в этой обмотке нет точек одинакового потенциала, а следовательно, не может быть и уравнительных соединений.

В симметричной множественной последовательной обмотке ( $a > 1$ ) точки одинакового потенциала имеются, но так как эта обмотка представляет, как мы знаем, комбинацию нескольких простых последовательных обмоток, то к недочетам в магнитной системе она также совершенно не чувствительна, а следовательно, и не нуждается в устройстве уравнительных соединений первого рода.

б) **Цель уравнительных соединений в множественных последовательных обмотках.** Возьмем восьмиполюсную машину с симметричной двукратно замкнутой множественной последовательной обмоткой, распадающейся на две простые последовательные обмотки (фиг. 152). Число коллекторных пластин

в такой машине должно быть кратно 2, причем одна из простых обмоток буде соединяться с нечетными, другая — с четными коллекторными пластинами назовем их соответственно первой и второй обмоткой.

Так как обе простые обмотки совершенно тождественны, то при нагрузке машины ток делился бы между ними поровну, если бы сопротивление контакта щеток с пластинами обеих обмоток было совершенно одинаковым и устойчивым. В действительности, однако, сопротивление контакта щеток зависит от весьма многих причин и при работе машины обычно сильно колеблется; благодаря этому равное распределение тока между первой и второй обмотками должно неизбежно нарушиться, а это может создать неудовлетворительные условия для коммутации



Фиг. 152. Уравнительное соединение в множественной последовательной обмотке

Практика показала, что все неблагоприятные обстоятельства исчезают, если рассматриваемую обмотку снабдить уравнительными соединениями. Технически эти соединения выполняются так же, как и в простых параллельных обмотках, но роль их в данных случаях другая. Там они служили способом борьбы с недочетами в работе обмотки, вызываемыми дефектами в конструктивном выполнении машины, здесь же, в применении к множественной последовательной многократно замкнутой обмотке, эти соединения имеют целью, во-первых, равномерно распределить ток между всеми параллельными ветвями обмотки и, во-вторых, поддерживать равномерное распределение потенциала по коллектору, их можно называть уравнительными соединениями второго рода

Рассмотрим на фиг. 152 любые две соседние коллекторные пластины, принадлежащие одной и той же простой обмотке, например, пластины 1 и 45, принадлежащие первой обмотке. Между ними мы имеем  $p = 4$  последовательно соединенных секций; сумма индуктируемых в этих секциях э. д. с. будет определять при холостом ходе машины и отсутствии на коллекторе щеток напряжение между пластинами 1 и 45. Если середину этих четырех секций, а именно пластину 23, мы соединим с пластиной 46, лежащей между пластинами 45 и 1, то потенциал пластин 46 и 23 сделается одинаковым, а напряжение между пластинами 45 и 1 будет делиться пластиной 46 на две равные части. Шаг по коллектору между соединенными пластинами может быть установлен на основе следующих соображений. Между двумя какими-либо пластинами, принадлежащими к одной из множественных обмоток, лежат с одной стороны якоря  $a$  пластин, а с другой  $(K - a)$  пластин. Пластины, делящие напряжение между  $(K - a)$  пластинами так же, как делят это напряжение  $a$  пластин, будут лежать на расстоянии

$$\frac{K - a}{a}.$$

Между лежащими в одинаковых потенциальных условиях пластинами разных обмоток будем иметь тогда сдвиг

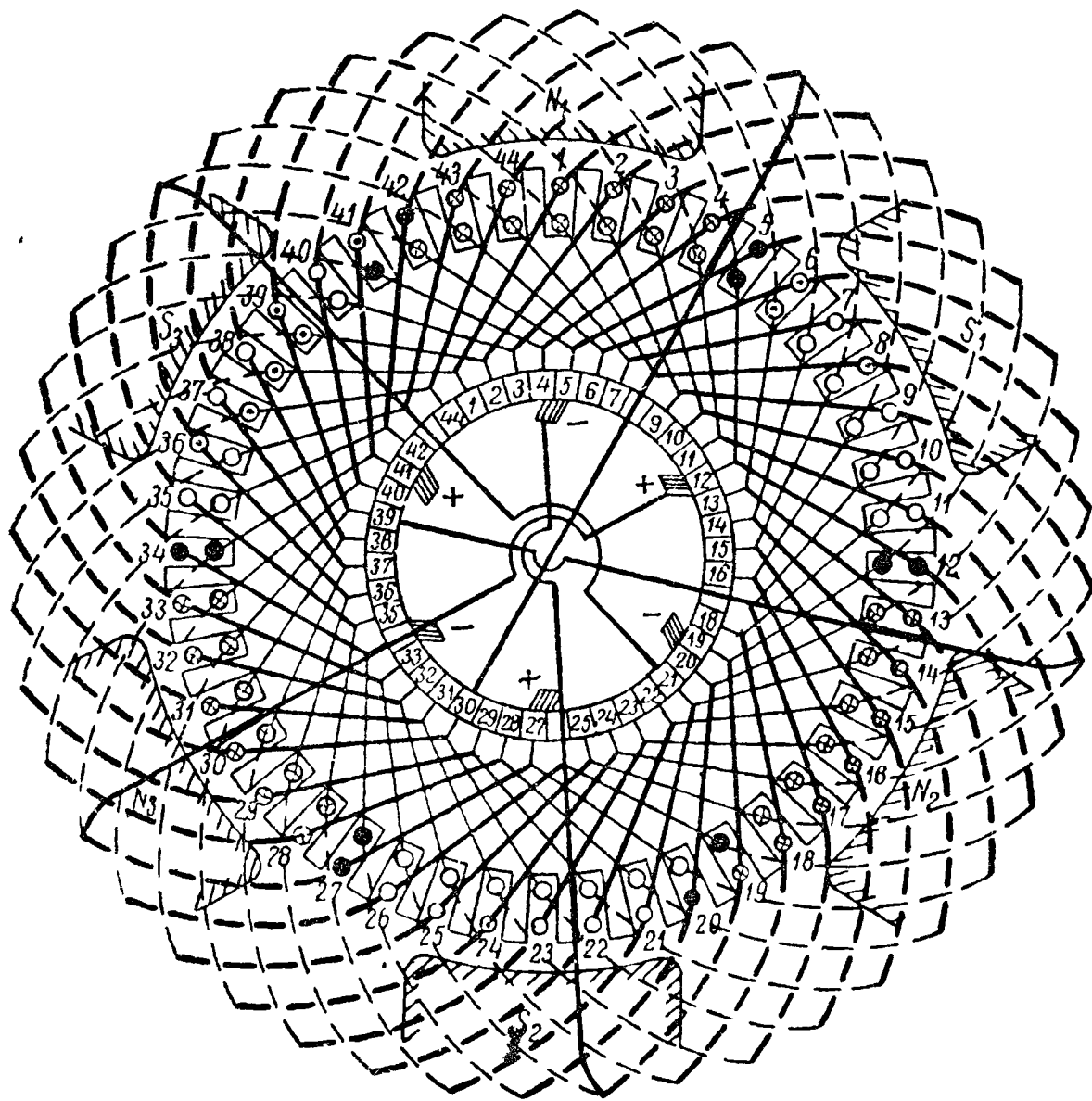
$$y_p = \frac{K-a}{a} + 1,$$

или

$$y_p = \frac{K}{a}$$

Подобных соединений в машине можно сделать (169):

$$n_p = \frac{K}{a}.$$



Фиг. 153 Множественная последовательная двукратно замкнутая обмотка шестиполюсной машины.

Вследствие полной идентичности первой и второй обмоток, по осуществленным уравнительным соединениям при отсутствии на коллекторе щеток не должно проходить никаких токов. При наложении на коллектор полного числа комплектов щеток, но при холостом ходе машины, равенство потенциалов пластин, связанных уравнительными соединениями, неизбежно должно несколько нарушиться, так как коммутирование секций обеих простых обмоток не будет происходить одновременно. Это равенство нарушится еще значительно при нагрузке машины, если вследствие разницы в сопротивлении контактов щеток с пластинами обеих обмоток ток нагрузки распределится между ними неодинаково. Очевидно, что в этих случаях по уравнительным соединениям и по обеим обмоткам должны будут пройти уравнительные токи, которые восстановят нарушенное равенство потенциалов теоретически равнопотенциальных пластин и тем заставят обе обмотки работать в совершенно одинаковых условиях.

Возьмем теперь шестиполюсную машину с симметричной множественной последовательной двукратно замкнутой обмоткой (фиг 153).

В этой машине между любыми смежными коллекторными пластинами, принадлежащими одной и той же обмотке, например между пластинами 3 и 5, имеем  $p = 3$  последовательно соединенных секций. Желая в этом случае разбить напряжение, имеющееся между рассматриваемыми пластинами, на две

равные части, мы должны будем соединить пластину 4 со средней (задней) точкой секции 19—26, для чего придется проводить уравнильные соединения через внутреннюю полую часть якоря.

Для потенциального шага в этом случае имеем формулу:

$$y_p = \frac{K}{a} \pm \frac{1}{2};$$

здесь половина указывает, что соединение идет с одной стороны обмотки к другой.

Из сопоставления двух приведенных примеров нетрудно усмотреть, что для того, чтобы все уравнильные соединения множественной последовательной обмотки располагались по одну сторону якоря, необходимо третье условие симметрии  $\left(\frac{2p}{a} = \text{ц. ч.}\right)$  заменить более тяжелым условием:

$$\frac{p}{a} = \text{ц. ч.} \quad (238)$$

В случае шестиполусной машины из множественных последовательных обмоток практический интерес представляет только обмотка с  $a = 2$ , так как при  $a = 1$  получаем простую последовательную обмотку (не нуждающуюся в уравнильных соединениях), а при  $a = 3$  можем осуществить простую параллельную обмотку ( $a = p$ ), которая технически более совершенна, чем множественная последовательная обмотка (§ 107). Но, как мы только что видели, при  $a = 2$  множественная последовательная обмотка шестиполусной машины ( $p = 3$ ) получает уравнильные соединения, которые необходимо протягивать внутри якоря, что сильно удорожает работу. Вследствие этого многие заводы этой обмотки стараются избегать и вообще делают множественную последовательную обмотку только для случаев, когда удовлетворено равенство (238), т. е. когда  $\frac{p}{a} = \text{ц. ч.}$  Нужно, однако, сказать, что в некоторых случаях отказ от применения множественной последовательной обмотки в шестиполусной машине ( $a = 2, p = 3$ ) ведет к таким же затруднениям, к каким приводит иногда стремление избежать несимметричной простой последовательной обмотки в четырехполусной машине (§ 100).

В множественных последовательных однократно замкнутых обмотках все коллекторные пластины имеют вполне определенный потенциал и при отсутствии на коллекторе щеток, а потому в них как будто нет надобности в уравнильных соединениях. Практика, однако, показала, что и эти обмотки работают удовлетворительно только при наличии уравнильных соединений, так как только тогда удастся получить равномерное распределение внешнего тока машины между всеми параллельными ветвями обмотки. Вследствие этого в настоящее время уравнильные соединения устраивают во всех без исключения практически применяемых (т. е. симметричных) множественных последовательных обмотках.

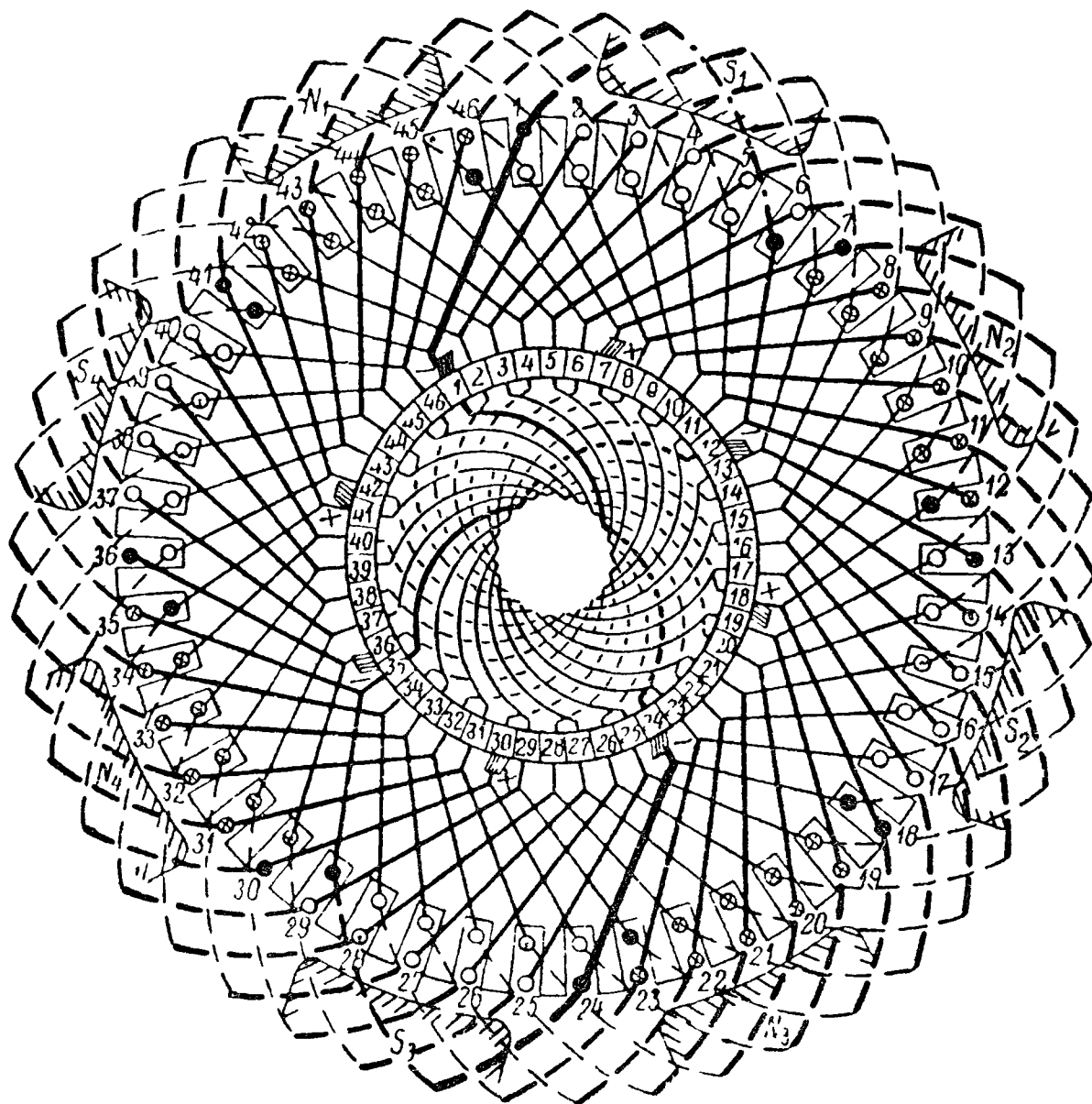
**в) Выбор числа групп уравнильных соединений в множественных последовательных обмотках.** Число групп уравнильных соединений в множественных последовательных обмотках желательно делать с вышерассмотренной точки зрения возможно большим, т. е. равным  $\frac{K}{a}$ . Однако существует соображение, указывающее на необходимость некоторого ограничения этого числа.

В самом деле, если в симметричной множественной последовательной обмотке сделать максимальное возможное число групп уравнильных соединений, то тогда уравнильные соединения будут выполнять в ней не только роль уравнильных соединений второго рода, но и роль уравнильных соединений первого рода. На фиг. 154 представлена восьмиполусная машина с двойственной последовательной ( $a = 2$ ) однократно замкнутой обмоткой,



снабженной полным числом групп уравнительных соединений ( $n_p = \frac{K}{a} = 22$ ). Как видим из фигуры, секции 1—6 и 24—29 оказываются приключенными друг к другу параллельно так же, как это имеет место в простых параллельных обмотках

Если бы потоки полюсов  $S_1$  и  $S_3$  оказались неодинаковыми, то тогда между секциями 1—6 и 24—29 возникли бы такие уравнительные токи, которые практически уничтожили бы это неравенство. Выравнивание потоков всех одноименных полюсов, а не только двух из четырех, как на фиг. 154, мы получим, если при  $p = 4$  возьмем множественную последовательную обмотку



Фиг 154 Множественная последовательная однократно замкнутая обмотка восьмиполюсной машины

с  $a = 4$  и устроим полное число уравнительных соединений. Тогда параллельно соединенными окажутся группы из  $a = 4$  секций, лежащие по одной под каждым из одноименных полюсов. Таким образом, если каждая из секций обмотки имеет уравнительное соединение, то множественная последовательная обмотка приобретает характерное свойство обмотки простой параллельной. Выше мы видели (§ 102, п. «в»), что простая параллельная обмотка при устройстве в ней уравнительных соединений по числу секций принимает характерное свойство последовательной обмотки, а именно селективное распределение тока между щетками. На основании этого можно сказать, что простая параллельная обмотка электрически совершенно тождественна множественной последовательной обмотке, имеющей  $a = p$ , если в обеих обмотках осуществлено максимальное возможное число уравнительных соединений.

Если уравнительные соединения второго рода являются одновременно и соединениями первого рода, как на фиг 155, то потери в этих соединениях увеличиваются, а так как для правильного функционирования множественных последовательных обмоток в уравнительных соединениях первого рода надобности нет, то их желательно избежать. Это оказывается возможным, если уравнительными соединениями снабжать только каждую  $p$ -тую или кратную  $p$  коллекторную пластину; тогда параллельно приключенными друг к другу через посредство уравнительных соединений оказываются лишь группы из  $p$

секций или из числа секций, кратного  $p$ . Суммы э. д. с. каждой таких  $p$  секций будут друг другу равны, а следовательно, они взаимно уравновесятся.

В машинах с сложными последовательными обмотками ( $a > 1$ ) количество уравнивательных колец принимают в пределах от 3 до 15, в зависимости от величины якоря и от соотношения чисел  $K$ ,  $p$  и  $a$ , располагая их концентрично на обмоткодержателе на задней стороне якоря, причем к каждому кольцу присоединяются  $a$  равнопотенциальных точек обмотки. Сечение этих уравнивательных колец принимается в 1,5—2 раза больше сечения проводника обмотки якоря.

#### 104. Уравнивательные соединения в множественных параллельных обмотках

В множественной параллельной обмотке необходимо устройство уравнивательных соединений двоякого рода. Как обмотка параллельная, она нуждается в уравнивательных соединениях первого рода (выравнивающих потоки отдельных полюсов), как обмотка множественная, она весьма чувствительна к неравенству переходного сопротивления контакта отдельных щеток и вследствие этого должна быть снабжена уравнивательными соединениями второго рода, а именно, в ней напряжение между двумя следующими друг за другом коллекторными пластинами, принадлежащими одной и той же простой обмотке, должно делиться лежащей между ними пластиной (которая принадлежит второй простой обмотке) на две равные части. Только при выполнении этого условия напряжение между двумя смежными коллекторными пластинами будет иметь в каждый данный момент времени вполне определенное и притом наименьшее возможное значение.

а) Множественная двукратно замкнутая обмотка. Число коллекторных пластин в рассматриваемой обмотке четное, причем нечетные пластины принадлежат одной, а четные — другой из простых обмоток, на которые эта обмотка распадается (§ 96, п. «б»). Очевидно, что если потенциальный шаг

$$y_p = \frac{K}{p} = \text{нечетное число,}$$

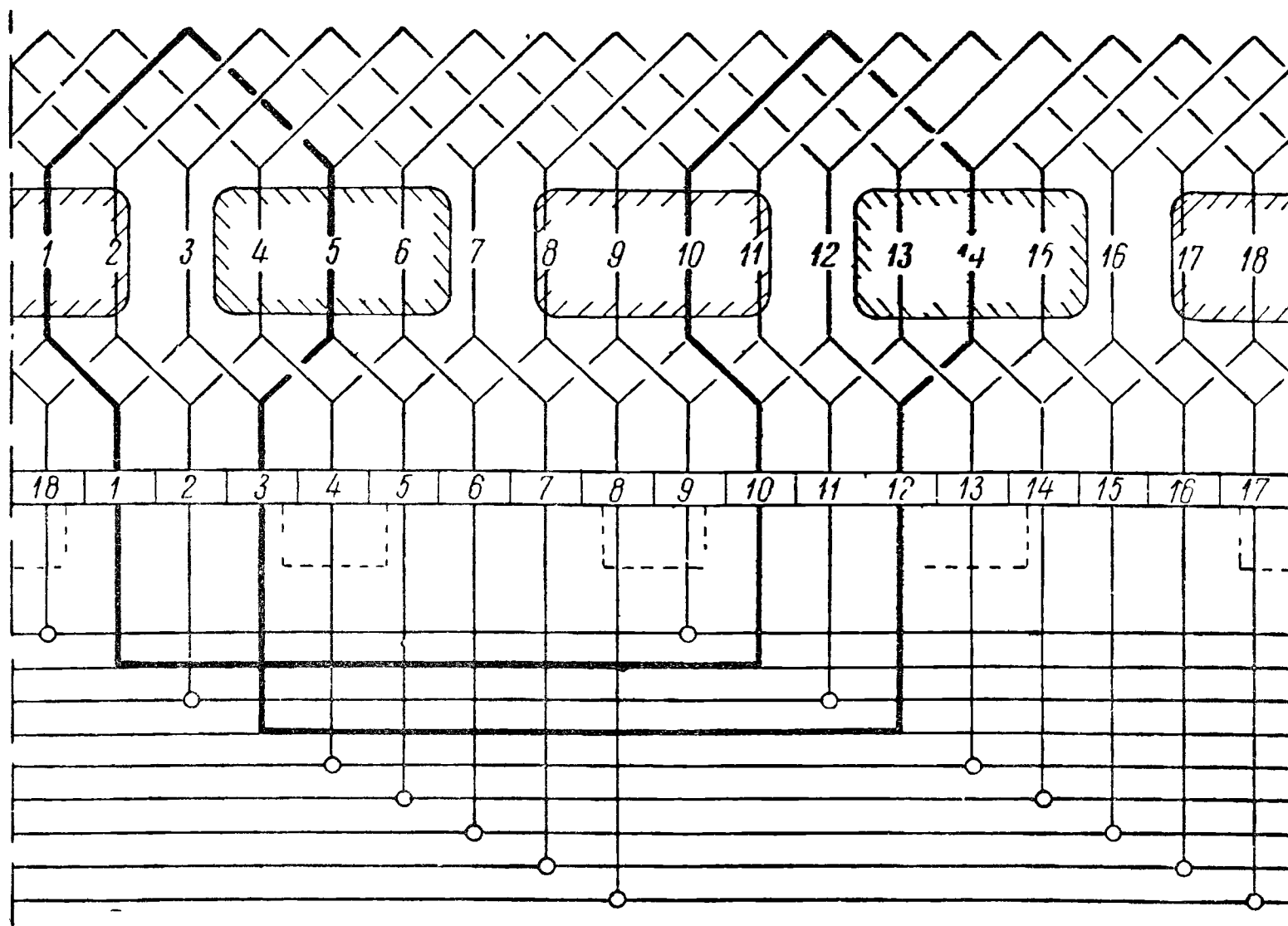
то уравнивательные соединения будут связывать друг с другом обе обмотки и явятся прежде всего уравнивательными соединениями второго рода. Если осуществить все возможные такие соединения, то тогда они будут выполнять одновременно и роль уравнивательных соединений первого рода, т. е. будут производить выравнивание потоков полюсов. Это видно из примера, приведенного на фиг. 155, на котором две секции, вычерченные жирно, оказываются соединенными параллельно друг с другом; каждая из них принадлежит при этом другой простой обмотке.

Если потенциальный шаг

$$y_p = \frac{K}{p} = \text{четное число,}$$

то тогда уравнивательные соединения, как легко сообразить, будут связывать друг с другом равнопотенциальные точки, принадлежащие одной и той же простой параллельной обмотке, а следовательно, явятся только уравнивательными соединениями первого рода. Вследствие этого возникает требование о непременно устройстве уравнивательных соединений второго рода, а следовательно, об отыскании равнопотенциальных точек, общих обеим простым обмоткам.

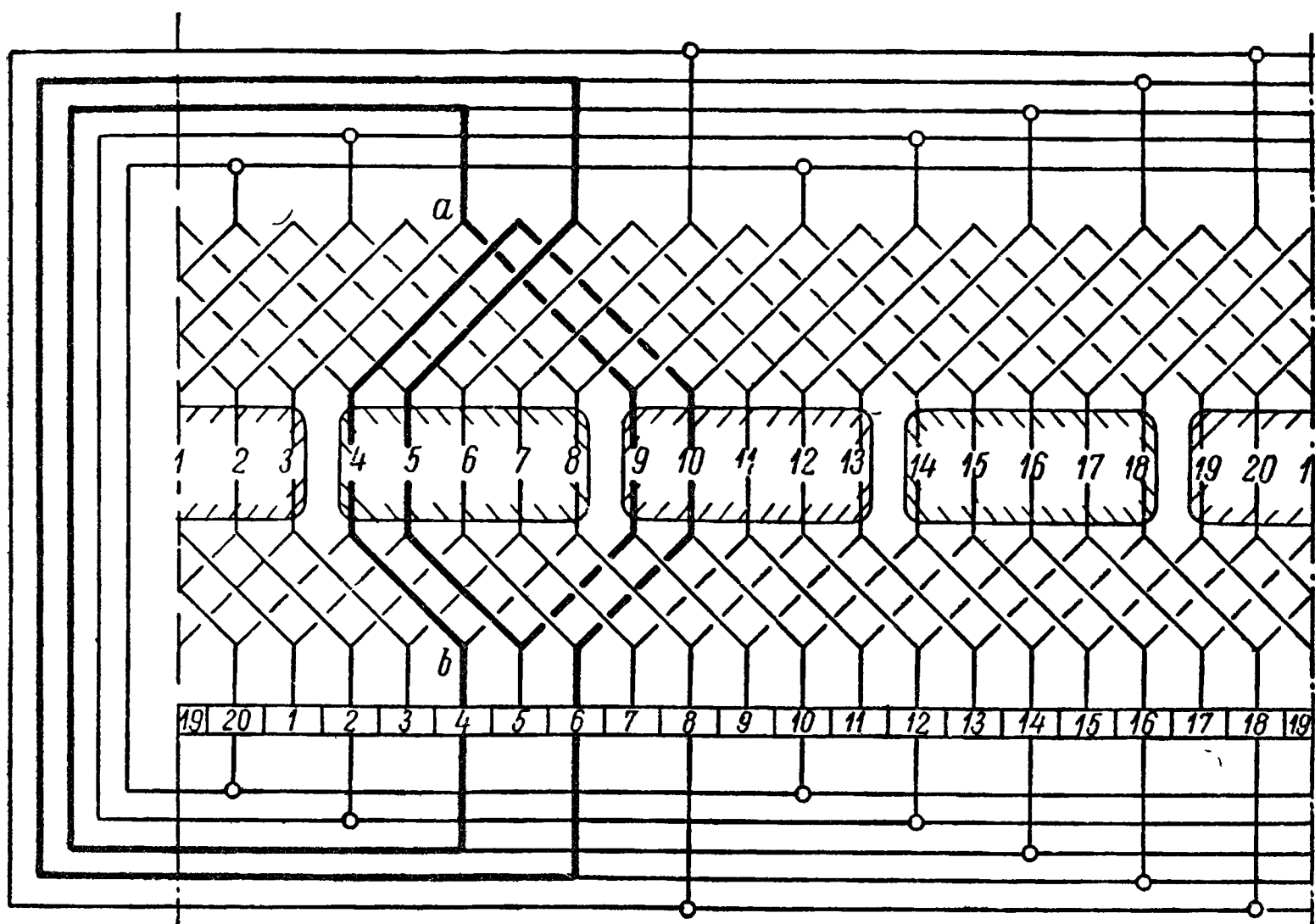
Рассматриваемая обмотка устраивается на практике всегда только с одним витком в каждой секции, а тогда заднее лобовое соединение каждого витка одной обмотки (например, точка  $a$  витка 3—9, фиг. 156) будет иметь потенциал, равный потенциалу переднего лобового соединения витка другой обмотки (точка  $b$  витка 4—10), присоединяемого к коллекторной пластине 4, которая



Фиг. 155. Уравнивательные соединения в множественной двухкратно замкнутой параллельной обмотке при  $\frac{K}{p} = \text{нечетному числу}$ .

вклинивается между пластинами 3 и 5, связанными с упомянутым витком 3—9 первой обмотки.

Соединение указанных равнопотенциальных точек возможно, очевидно, только через свободные отверстия между валом машины и сердечником якоря.



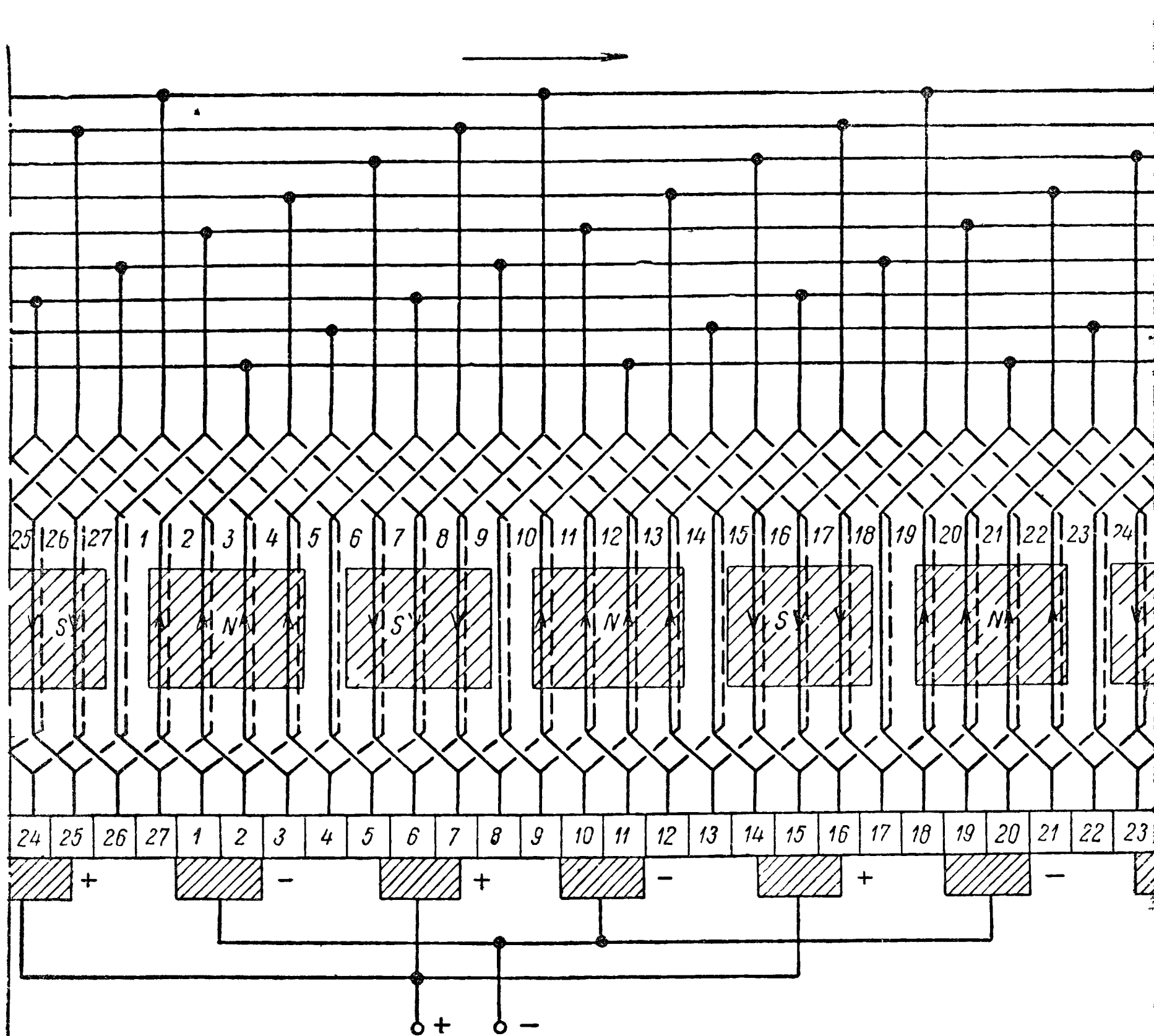
Фиг. 156. Уравнивательные соединения в множественной двухкратно замкнутой параллельной обмотке при  $\frac{K}{p} = \text{четному числу}$ .

Устройство таких соединений в конструктивном отношении вызывает много затруднений и стоит дорого. Ввиду этого естественным является стремление к уменьшению числа таких соединений без ухудшения качеств обмотки. Можно устраивать эти уравнивательные соединения первого рода в одной из простых

обмоток со стороны коллектора, а в другой обмотке — с противоположно стороны. Тогда для  $p$  точек обмотки потребуется только одно соединение второго рода.

Подобная обмотка для  $p = 2$  и  $u_s = 1$  дана на фиг. 156.

Уравнительные соединения, прокладываемые в действительности между валом и сердечником, начерчены с левой стороны фигуры. Два витка, которые оказываются соединенными при посредстве уравнительных соединений друг к другу навстречу, вычерчены жирно.



Фиг. 157. Уравнительные соединения в множественной однократно замкнутой параллельной обмотке.

б) Множественная однократно замкнутая обмотка. В случае множественной однократно замкнутой обмотки<sup>1</sup> будем иметь всегда  $\frac{K}{p} = \text{нечетное число}$ , так как  $K$  число нечетное. В этом случае выполняя уравнительные соединения, мы будем соединять с их помощью обе простые обмотки, входящие в состав множественной; таким образом, уравнительные соединения первого рода будут играть роль и уравнительных соединений второго рода. На фиг. 157 дана схема множественной однократно замкнутой параллельной обмотки шестиполюсной машины с уравнительными соединениями, выполненными со стороны, обратной коллектору. Уравнительные соединения выполняют одновременно роль уравнительных соединений первого и второго рода. Как

<sup>1</sup> Рассматриваем только обмотки с коэффициентом множественности  $m = 2$ , так как только такие обмотки находят практическое применение.



одно, каждая уравнительная шина присоединена в трех местах к обмотке якоря, причем одно из этих соединений относится к одной из простых обмоток, а два других — к другой простой обмотке.

### 105. Выполнение уравнительных соединений

Уравнительные токи эквивалентны токам короткого замыкания синхронного генератора. Величина последних (как то будет выяснено в курсе синхронных машин) зависит, в первую очередь, от индуктивного сопротивления обмотки, поэтому активное сопротивление уравнительных соединений не может оказать заметного влияния на величину уравнительных токов, и при выборе сечений этих соединений приходится руководствоваться общими соображениями, а именно: теряемой в этих соединениях энергией и нагревом проводников. Обычно при небольшом числе групп соединений площадь сечения последних делают такой же, как и у проводников якоря. При значительном же числе соединений идут в сторону некоторого уменьшения сечения. Это, однако, находит себе оправдание лишь в конструктивных соображениях. С увеличением числа групп уравнительных соединений происходит более совершенное выравнивание потоков отдельных полюсов и, при прочих равных условиях, уменьшение уравнительных токов, однако, с другой стороны, чем больше уравнительных соединений, тем меньше секций между ними и тем ощутительнее проявляется всякая разница в э. д. с.

Потери энергии в уравнительных соединениях понижают коэффициент полезного действия машины, а потому всегда желательно свести токи, протекающие по уравнительным соединениям, до возможного минимума. С этой целью, поскольку этому не мешает конструктивное устройство уравнительных соединений, рекомендуется по изготовлении машины произвести измерение э. д. с. отдельных ветвей ее обмотки до устройства соединений между одноименными щетками и до присоединения к обмотке уравнительных соединений. Присоединение последних к обмотке надлежит делать лишь тогда, когда обнаруженная несимметрия сведена путем надлежащей выверки зазора и креплений полюсных наконечников до возможного минимума.

## Д. ВЫБОР ТИПА ОБМОТКИ БАРАБАННОГО ЯКОРЯ

### 106. О необходимой ширине щеток в зависимости от типа обмотки

В простой параллельной обмотке при холостом ходе машины, теоретически говоря, достаточно, чтобы ширина щетки была немногим более ширины изоляционной прослойки между коллекторными пластинами. В работающей же машине по коммутационным соображениям ширину щетки нельзя делать менее 1,5 коллекторных делений. Обычно же она берется при угольных щетках в пределах от 2 до 3,5 коллекторных делений. В множественной последовательной обмотке, имеющей только две щетки, — по одной на каждую полярность, ширина щетки должна быть не менее ширины  $a$  коллекторных пластин, чтобы обеспечить отвод тока от всех  $a$  ветвей обмотки. Если обмотка симметрична и имеет полное число групп уравнительных соединений, то ширина щетки может быть сведена до одного коллекторного деления и сделана даже меньше его. Если же в машине осуществлена только  $1/a$  часть уравнительных соединений, то при наличии только двух щеток (по одной на каждую полярность) ширина их должна быть не менее  $a$  коллекторных делений.

При том же числе уравнительных соединений ( $1/a$  часть полного числа) и при  $2p$  щетках ширина последних должна быть не менее одной коллекторной пластины, но многие практики утверждают, что для безискровой коммутации и в этом случае ширина каждой щетки должна быть не менее ширины  $a$  пластин. Р. Рихтер же рекомендует делать ее равной  $a + 1$  коллекторным пластинам

[Л. 14]. Вследствие этого в множественных последовательных обмотках практически нельзя делать число пар параллельных ветвей больше четырех, что ограничивает область применения этой обмотки в многополюсных машинах и заставляет переходить к параллельной обмотке.

### 107. Сравнение обмоток с технической точки зрения

При расчете машины постоянного тока выбор наш должен остановиться на одном из следующих четырех типов обмоток:

- 1) простая параллельная;
- 2) множественная параллельная;
- 3) простая последовательная,
- 4) множественная последовательная.

Каждой из этих обмоток присущи свои достоинства и свои недостатки. Главным недостатком простой параллельной обмотки является большая чувствительность к недочетам в магнитной системе, что влечет за собою неравномерное распределение тока в отдельных ветвях обмотки (§ 102). От этого недостатка совершенно свободна простая последовательная обмотка (§ 103), но зато она обладает другим слабым местом, которого нет в простой параллельной обмотке, а именно большой чувствительностью к неравенству переходного сопротивления контакта отдельных щеток (селективное распределение тока § 75). Последствием как одного, так и другого недостатка является ухудшение процесса коммутации машины.

Весьма действительным средством борьбы с упомянутым недостатком простой параллельной обмотки являются надлежащим образом выполненные уравнивательные соединения первого рода. Для уменьшения вредных последствий от селективности распределения тока между щетками, отводимого от машины с последовательной обмоткой, прибегают к увеличению (примерно на 20%) общей контактной поверхности щеток против той, которая потребовалась бы при данном значении тока машины и данном сорте щеток, если бы распределение тока между всеми щетками происходило равномерно. Конечно, от селективного распределения тока мы могли бы совершенно избавиться, если бы на коллекторе установили щетки только в двух коммутационных зонах, — в одной положительной и в одной отрицательной. Однако это повело бы к удорожанию коллектора, который плохо использовался бы, а при мало-мальски значительной мощности машины принял бы совершенно неконструктивные размеры. Кроме того, при наличии только одной пары щеток мы получаем значительную разницу в числе секций обеих ветвей простой последовательной обмотки в момент переключения щетками секций из одной ветви в другую; эта разница тем больше, чем больше  $p$ , в чем нетрудно убедиться из рассмотрения конкретных обмоток. Далее мы видели, что при наличии одной пары щеток каждая из них замыкает накоротко  $p$  последовательно соединенных секций (§ 72), что вредно сказывается на коммутации. При установке же полного числа щеток короткозамыкаемые секции оказываются соединенными не только последовательно, но и параллельно; вместе с тем в этом случае уменьшается отмеченное выше неравенство числа активных секций в обеих ветвях обмотки в моменты коммутации.

Из множественных параллельных обмоток практически применяемой, как мы видели (§ 104), является как двукратно замкнутая, так и, в последнее время, однократно замкнутая; из этих обмоток двукратно замкнутая оказывается весьма чувствительной и к неравенству контактных сопротивлений отдельных щеток, что влечет за собою искажение плавности распределения потенциала по коллектору. Мерой борьбы с этим недостатком служат уравнивательные соединения второго рода.

Однократно замкнутая обмотка, несмотря на свою кажущуюся асимметрию, дает лучшую фиксацию напряжения на коллекторе и вследствие этого предпочтительнее.

Искажение плавности распределения потенциала по коллектору имеет место при неравенстве контактных сопротивлений отдельных щеток и в случае множественных последовательных обмоток. Мерой борьбы с ними служат те же уравнивательные соединения второго рода (§ 104). Эта обмотка, таким образом, вдвойне чувствительна к несовершенству контакта щеток, — как последовательная и как множественная.

К недостаткам последовательных обмоток, затрудняющим их применение, принадлежит отчасти то обстоятельство, что для их осуществления требуются определенные соотношения между  $Z$ ,  $p$ ,  $a$  и  $u_s$  (§ 97). В особенности это относится к множественным последовательным обмоткам; для надлежащей работы последние должны быть непременно снабжены уравнивательными соединениями второго рода, а потому в них применение того средства, которое допускают простые последовательные обмотки — устройство мертвых секций (§ 100), когда требуемые соотношения параметров  $Z$ ,  $p$ ,  $a$  и  $u_s$  не выходят, — затруднительно.

Практическое выполнение простой параллельной обмотки, как мы видели, не встречает никаких затруднений (§ 96), практическое же осуществление множественной параллельной обмотки сопряжено с большими трудностями, а потому эту обмотку с технической точки зрения следует поставить на последние места.

Сопоставляя все вышеизложенное, а также данные опыта, мы можем расположить обмотки с точки зрения их технической желательности в следующем порядке:

- 1) простая параллельная;
- 2) простая последовательная;
- 3) множественная последовательная;
- 4) множественная параллельная.

При этом обмотки первая, третья и четвертая должны быть снабжены надлежащими уравнивательными соединениями.

При расчете машины, однако, приходится руководствоваться не только техническими, но и экономическими соображениями. От проектировщика машины требуется, чтобы машина была не только технически возможно совершенной, но и возможно дешевой. При учете же экономических факторов порядка, в котором приходится выбирать обмотку, изменяется.

## 108. Сравнение обмоток с экономической точки зрения

Требования экономического характера в отношении осуществления обмотки сводятся в конечном счете к возможно лучшему использованию меди. Назовем отношение площади сечения меди всех уложенных во впадину проводников к площади сечения самой впадины коэффициентом заполнения впадины и обозначим его через  $f_n$ :

$$f_n = \frac{\text{площадь сечения меди одной впадины}}{\text{площадь сечения одной впадины}}.$$

Очевидно, что  $f_n$  будет тем больше, чем меньше число проводников во впадине, так как тогда изоляция будет занимать меньше места. Отсюда следует, что при расчете обмотки надлежит стремиться к возможно меньшим значениям числа проводников.

При расчете обмотки все факторы, входящие в формулу для э. д. с. машины (198):

$$E = \frac{pn}{60} \Phi \frac{N}{a} \cdot 10^{-8},$$

кроме  $N$  и  $a$ , являются установленными, — частью заданием ( $E$ ,  $n$ ), частью по другим соображениям ( $p$ ,  $\Phi$ ). Очевидно, что  $N$  мы получим тем меньше, чем меньше  $a$ ; минимальное же значение  $a = 1$  дает простая последовательная

обмотка, а потому при расчете обмотки с нее и приходится начинать. Кроме вышеотмеченных затруднений при попытке применить для машины простую последовательную обмотку (необходимость согласовать  $Z$ ,  $p$  и  $u_s$ ), мы должны учесть еще два обстоятельства. Во-первых, в машинах без добавочных полюсов как показал опыт, не следует идти с током  $i_a = \frac{I_a}{2a}$  выше 250 а; вообще же предпочтительнее оставаться при напряжении свыше 120 в в пределах 150—200 а, при наличии добавочных полюсов предел для  $i_a$  лежит выше, и имеются примеры успешно работающих последовательных обмоток с током  $i_a$ , достигающим до 550 а, при этом  $u_s$  берется равным единице, так как с общим объемом тока во впадине, как показал опыт, не следует выходить за 1000 а; при отсутствии добавочных полюсов рекомендуется держаться в пределах 900 а. Другим ограничением для применения последовательной обмотки является предельное допустимое значение для максимального напряжения между двумя смежными коллекторными пластинами  $E_{dm}$  (см. гл. V, § 131). Эта разность для больших машин не должна превышать 28 в.

Когда по той или иной причине простую последовательную обмотку осуществить нельзя, приходится переходить к обмотке с большим числом параллельных ветвей; выбирая  $a$  по вышеприведенным указаниям относительно  $i_a$  и контролируя  $E_{dm}$ . Если производим расчет четырехполюсной машины,  $p = 2$  (двухполюсными делаются лишь очень маленькие машины) и для нее простая последовательная обмотка оказывается невыполнимой, то, переходя к большему значению  $a$ , получаем  $a = 2$ ; так как при этом  $a = p$ , то осуществима простая параллельная обмотка, которая, конечно, и делается ввиду ее преимущества перед множественной последовательной с тем же числом параллельных ветвей.

Если симметричная множественная последовательная обмотка не может быть выполнена, то переходим к простой параллельной.

Ввиду технических преимуществ простой параллельной обмотки над множественной последовательной, первую применяют часто и тогда, когда по расчету следовало бы и возможно осуществить множественную последовательную обмотку. При этом уменьшается ток  $i_a$  и получается худшее использование впадин. Как предельное допустимое минимальное значение для тока в одной ветви такой обмотки нужно считать  $i_a = 80$  а.

В предельных случаях, когда  $a$  должно быть больше  $p$ , прибегают к множественной параллельной обмотке.

### 109. Резюме

Резюмируя, мы можем расположить обмотки в следующем порядке их желательного применения при практическом расчете машины:

- 1) простая последовательная,
- 2) множественная последовательная;
- 3) простая параллельная,
- 4) множественная параллельная.

На основании данных практики можно составить таблицу, показывающую для каких мощностей при обычных промышленных напряжениях возможно осуществить с простой последовательной обмоткой машину постоянного тока нормальной открытой конструкции и нормальной скорости (табл. 15)

Таблица 15

#### Пределы применения простой последовательной обмотки

Напряжение машины, в	Возможная предельная мощность, квт
110	50
220	100
500	250



## ГЛАВА V

### ЯВЛЕНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С НАГРУЗКОЙ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

#### А. РЕАКЦИЯ ЯКОРЯ И КОММУТАЦИЯ ПРИ НАГРУЗКЕ ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА

##### 110. Влияние нагрузки якоря на основное поле генератора постоянного тока и связанные с этим явления

Первоначально рассмотрим случай машины постоянного тока, не имеющей добавочных магнитных полюсов.

В машине, вращающейся генератором вхолостую, единственным источником м. д. с., определяющей магнитное состояние машины, являются катушки полюсов. В нагруженной же машине, вследствие наличия тока в якоре, последний также становится источником м. д. с. Очевидно, что тогда магнитное состояние машины (величина полезного потока, величина потоков рассеяния, распределение индукции в зазоре и т. д.) будет зависеть от результирующей м. д. с., а следовательно, вообще говоря, изменится.

Воздействие тока, проходящего по якору, на магнитный поток главных магнитных полюсов носит название реакции якоря. Исследованию этого явления и посвящен данный параграф, причем ради простоты мы будем исходить первоначально из рассмотрения явления на двухполюсной машине, опуская на рисунках коллектор и мысля щетки поставленными непосредственно на проводниках.

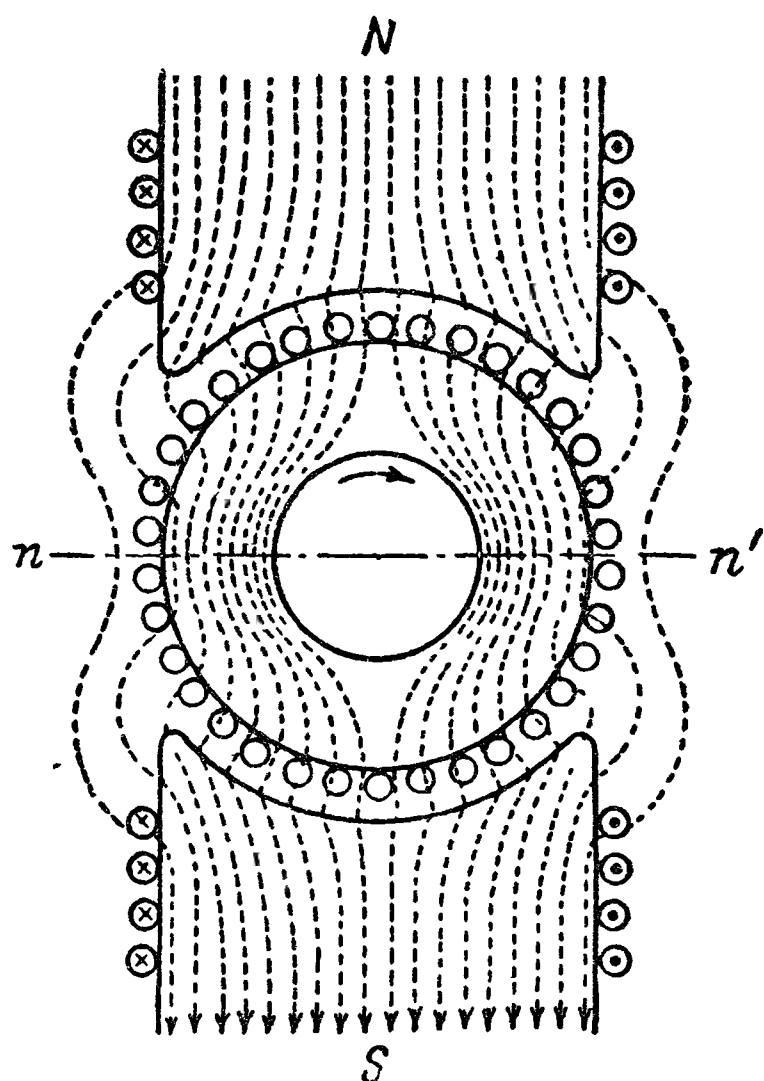
На фиг. 158 показано распределение магнитного потока полюсов такой машины при холостом ходе ее. Нейтральная магнитная зона ( $B_d = 0$ ) совпадает с геометрической магнитной нейтралью, составляющей с осью полюсов угол в  $90^\circ$ . Оставим теперь полюсы невозбужденными и пропустим по якору от постороннего источника ток таким образом, чтобы направление его в проводниках якоря соответствовало тому, которое получится в них при правом вращении якоря и полюсах, возбужденных, как на фиг. 158. Распределение магнитного потока, создаваемого в этом случае обмоткой якоря, представлено на фиг. 159.

В двухполюсной машине при выбранном расположении щеток — на геометрической магнитной нейтрали — ось поля якоря, определяемая линией щеток, оказывается перпендикулярной к оси полюсов; мы можем поэтому сказать, что поле якоря в данном случае является поперечно действующим.

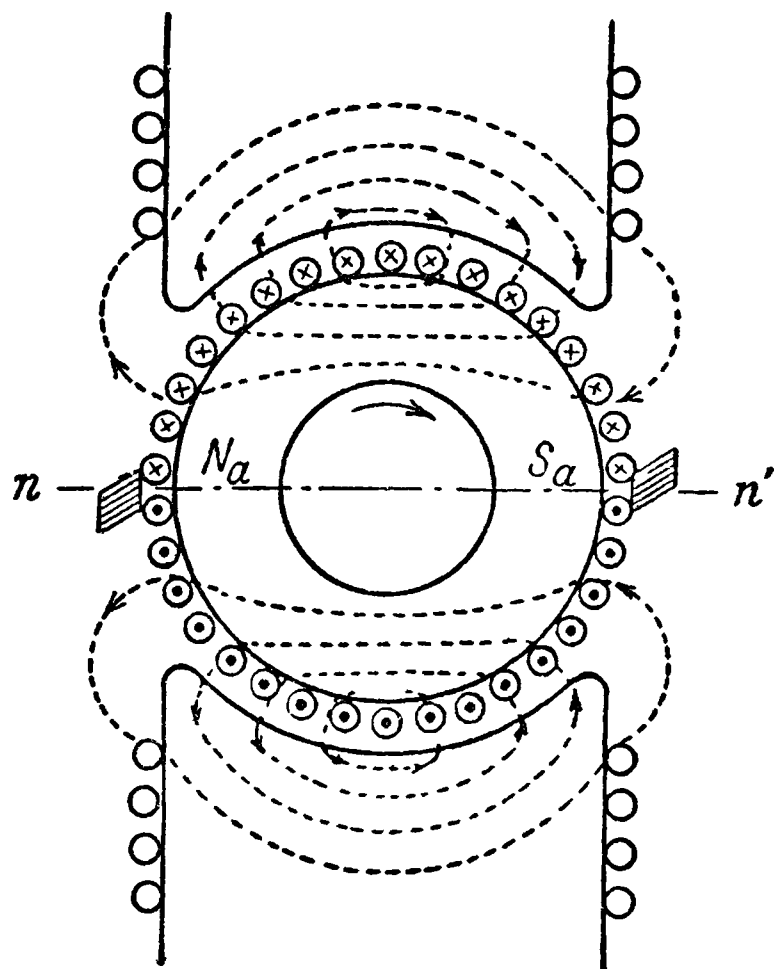
На поле, создаваемое полюсами, род обмотки, а стало быть, и характер соединения проводников друг с другом не оказывают влияния, так как эти соединения делаются в плоскостях, находящихся вне магнитной цепи машины. Ту же картину распределения магнитных потоков, при тех же токах в обмотках полюсов и якоря, мы получим и в случае заторможенного якоря. В покоящемся якоре мы, очевидно, можем мыслить действительную обмотку якоря замененной другой, состоящей из витков, ось которых совпадает с линией

щеток (фиг. 160). Применяя ту же идею к многополюсной машине, получим фиг. 161.

Если предположим, что магнитная система машины не насыщена, то картину распределения магнитных линий в машине, работающей генератором при



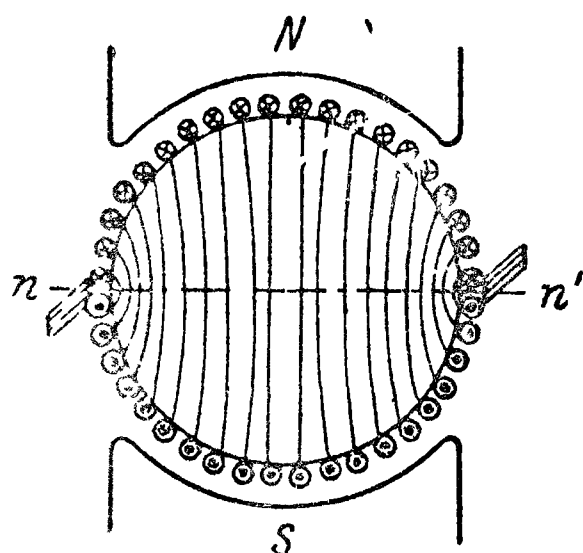
Фиг. 158. Распределение магнитного потока полюсов двухполюсной машины при холостом ходе.



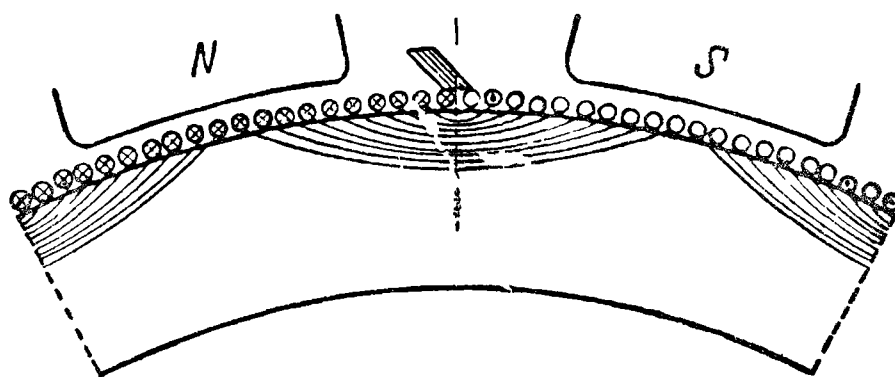
Фиг. 159. Распределение магнитного потока, создаваемого обмоткой якоря.

правом вращении якоря в падающем потоке, можно получить путем наложения фиг. 158 на фиг. 159, получим фиг. 162.

Очевидно, что в результирующей картине (фиг. 162) под сбегающим краем полюсов получим сгущение, а под набегающим краем — разрежение магнитных линий, вследствие чего ось результирующего потока окажется повернутой относительно оси полюсов на некоторый угол  $\alpha$  в направлении вращения машины. На тот же угол  $\alpha$  повернется (вследствие симметрии конструкции машины) и физическая магнитная нейтраль поля.



Фиг. 160. Замена действительной обмотки якоря другой обмоткой, состоящей из витков, ось которых совпадает с линией щеток.



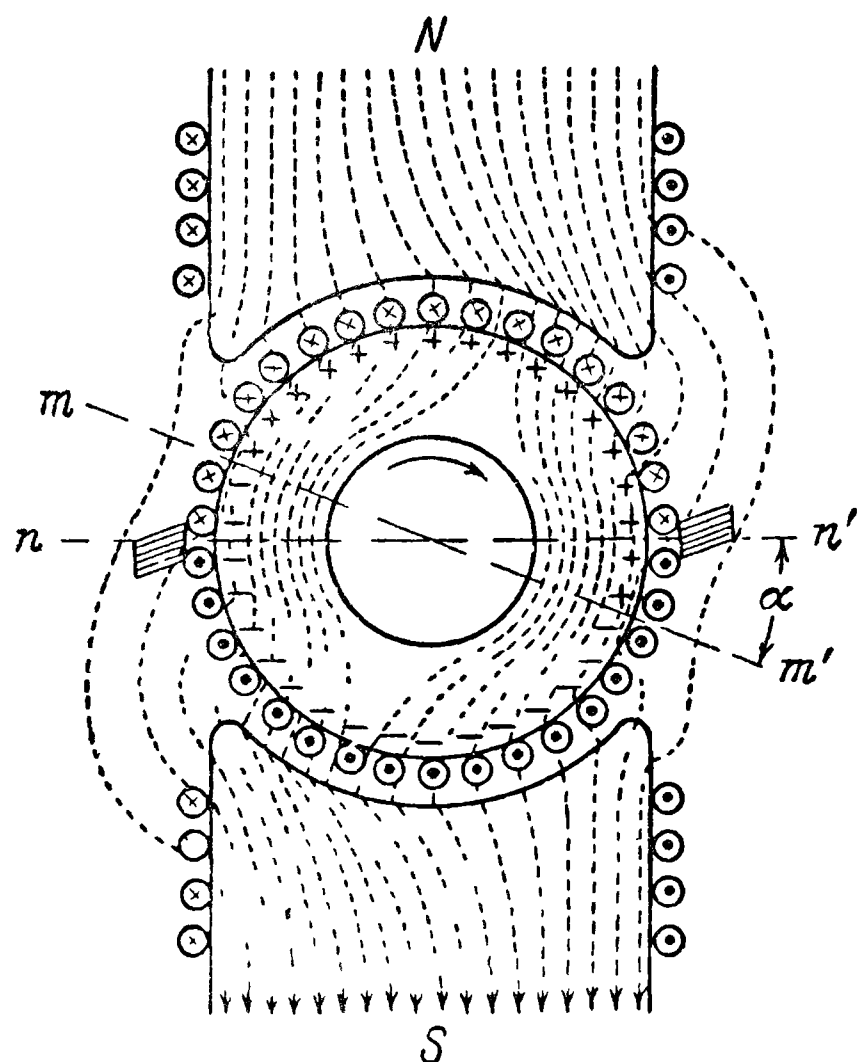
Фиг. 161. Замена действительной обмотки обмоткой, состоящей из витков, ось которых совпадает с линией щеток для многополюсной машины.

Общее число линий, входящих в якорь между щетками, останется при принятом предположении, что машина не насыщена, тем же, вследствие чего можем сказать, что в этом случае искажение поля, вызванное реакцией якоря, не скажется на величине э. д. с., индуцируемой в обмотке якоря.

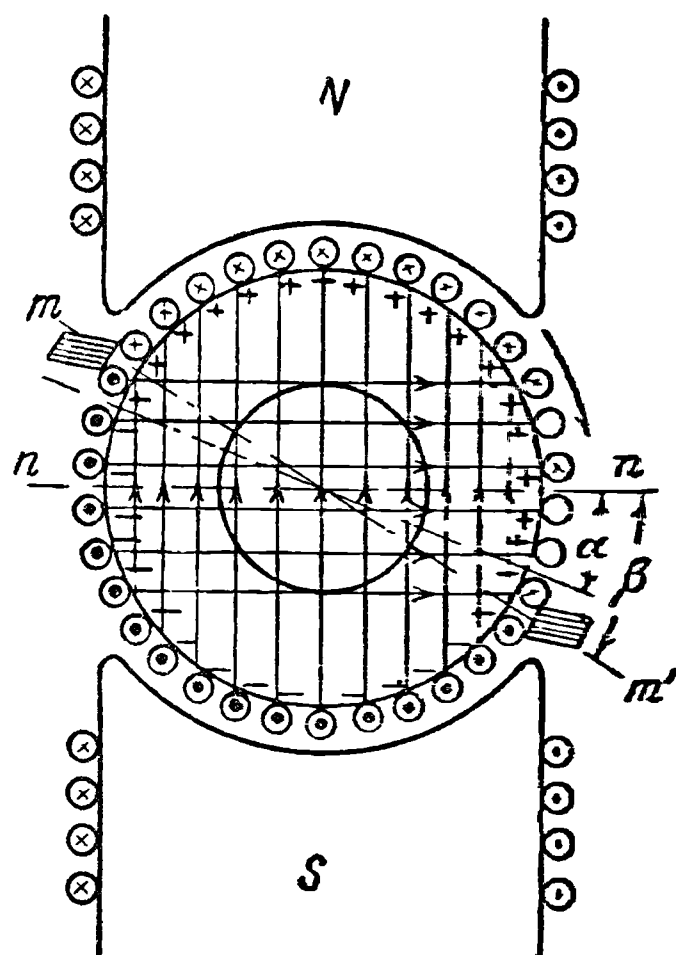
Сдвиг физической магнитной нейтрали влечет, однако, за собой другое, весьма нежелательное, последствие. Как уже выяснилось в главе об обмотках, каждая секция якоря, проходя через короткое замыкание ее щеткой, переключо-

чается из одной ветви обмотки в другую. До короткого замыкания ток в секции имеет одно направление, после выхода секции из-под щетки направление тока в ней должно быть обратное. Если этот процесс обращения тока, называемый коммутацией тока, успевает закончиться полностью к моменту входа секций в новую ветвь, то все происходит благополучно, в противном же случае щетки начинают сильно искрить, коллектор греется, пластины его выгорают и приходят в негодность.

Рассмотрим подробнее фиг. 162, на ней значками, поставленными на разрезах проводников, указано направление в них тока: крест — от нас, точка — к нам. При этом нужно отметить, что во всех проводниках, лежащих по одну



Фиг. 162 Картина результирующего поля в двухполюсной машине при нагрузке



Фиг. 163 Разделение обмотки якоря на продольно и поперечно действующие обмотки.

и ту же сторону от линии, которая соединяет щетки, ток должен иметь одинаковое направление. Направление индуцируемых в проводниках э. д. обозначено значками плюс и минус, поставленными под проводниками: плюс — от нас, минус — к нам. Как видим, на участках окружности якоря, соответствующих углу  $\alpha$  — сдвигу нейтральных магнитных точек поля, — э. д. с. имеют направление, противоположное тому, которое получается на остальной части полуокружности якоря, заключенной между щетками. Из фиг. 16 нетрудно заключить, что если щетки оставить на геометрической магнитной нейтральной, то э. д. с., индуцируемая в короткозамкнутой секции результирующим полем, будет создавать ток, имеющий то же направление, какое имел ток в этой секции до начала коммутации, эта э. д. с. будет, таким образом, препятствовать коммутации.

Положим, что для уничтожения этого явления мы передвинули щетки на угол  $\beta$  (фиг. 163). Отметив направление протекающего по проводникам тока, приходим к заключению, что, с точки зрения влияния на поле, создаваемое полюсами, обмотку якоря мы можем мыслить теперь как бы состоящей из двух отдельных обмоток. Одна из них, мысленно образуемая из проводников, лежащих в угле  $2\beta$ , будет создавать м. д. с., направленную вдоль оси полюсов; другая, образуемая остальными проводниками, будет создавать м. д. с., с которой совпадет с геометрической магнитной нейтральной. Первую воображаемую обмотку назовем продольно действующей, вторую — поперечно действующей.

М. д. с. продольно действующей обмотки, будучи направлена навстречу м. д. с. обмотки полюсов, вызовет уменьшение потока, входящего в якорь, не искажая характера его распределения. Поперечно действующая обмотка, наоборот, не вызывая уменьшения потока (все в том же предположении, что машина не насыщена), произведет искажение его. Число витков поперечно действующей обмотки благодаря передвижению щеток стало меньше, чем было на фиг. 162, с другой стороны, благодаря продольно действующей обмотке основное поле теперь ослаблено. Поэтому сдвиг физической нейтрали будет иным, чем на фиг. 162, причем величина его будет зависеть от относительного влияния указанных двух факторов. Таким образом, вообще говоря, переставив щетки на угол  $\beta$  в направлении вращения, мы можем получить один из следующих трех случаев: 1) физическая магнитная нейтраль окажется сдвинутой на угол  $\alpha' < \beta$ , 2) — на угол  $\alpha' = \beta$  и 3) — на угол  $\alpha' > \beta$ . На фиг. 163 представлен случай, когда  $\alpha' < \beta$ .

Легко убедиться в том, что с коммутационной точки зрения желательным является первый случай. Действительно, если  $\alpha' < \beta$ , то в секции, замыкаемой щеткой накоротко, будет индуцироваться э. д. с., имеющая то же направление, в каком будет протекать по секции ток после выхода ее из-под щетки, а следовательно, эта э. д. с. будет способствовать изменению направления тока в секции. Это весьма важно потому, что изменению на обратное направление тока в секции якорной обмотки будет неизбежно препятствовать самоиндукция самой короткозамкнутой секции. Не вдаваясь в данном месте курса в более глубокое рассмотрение затронутых вопросов, мы можем все же вывести некоторые важные заключения:

Во-первых, из вышесказанного ясно, что для получения хорошей коммутации необходимо, чтобы щетки в машине, работающей генератором, были сдвинуты в направлении вращения машины на такой угол  $\beta$ , при котором индуцированная в короткозамкнутой секции э. д. с. оказалась бы по величине достаточной для компенсации э. д. с., создаваемой самоиндукцией секции.

Во-вторых, очевидно, что угол  $\alpha$  должен быть тем больше, чем больше ток нагрузки.

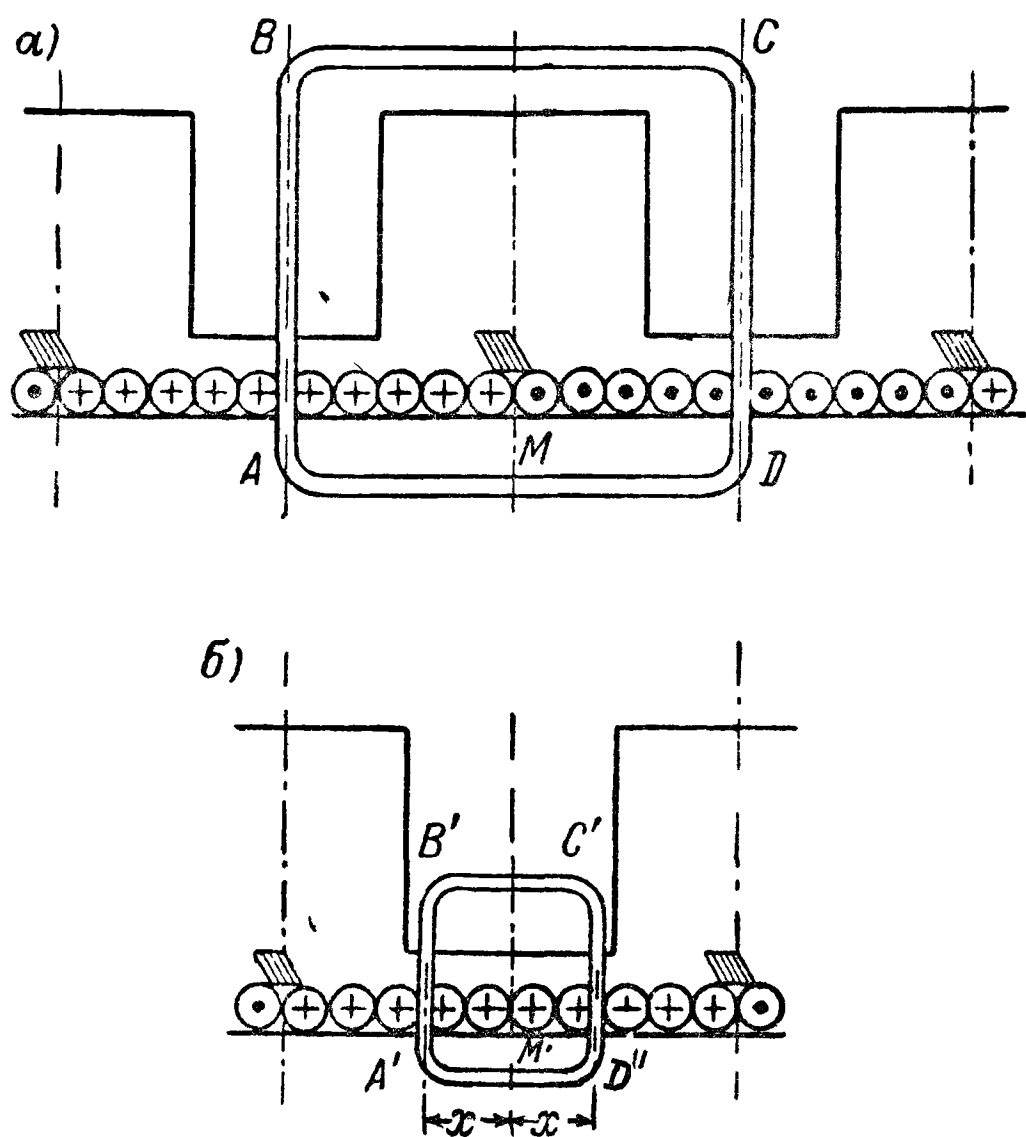
В-третьих, из изложенного следует, что м. д. с. якоря должна быть значительно меньше м. д. с. полюсов, так как в противном случае мы рискуем, как бы сильно мы ни сдвигали щетки, что сдвиг физической магнитной нейтрали  $\alpha'$  будет оказываться больше сдвига щеток  $\beta$ , и мы не сможем получить надлежащих условий для коммутации.

До сего времени мы вели рассуждения в предположении, что машина совершенно не насыщена, чего на практике не бывает. Как же скажется насыщение? Нетрудно видеть, что чем больше будет насыщение машины, тем меньше окажется размагничивающее действие (при том же значении  $\beta$ ) продольно действующей обмотки; но зато теперь поперечно действующая обмотка будет вызывать не только искажение поля, но и некоторое размагничивающее действие, так как ослаблению поля у набегающих концов полюсов не будет соответствовать усиление его у сбегающих концов (меньшая магнитная проницаемость!). Увеличивая угол сдвига щеток  $\beta$ , мы будем, с одной стороны, увеличивать размагничивание машины, создаваемое продольно действующей обмоткой, а это поведет к уменьшению общего потока, выходящего из полюсов; с другой стороны, — уменьшать м. д. с. поперечно действующей обмотки, а следовательно, и искажающее влияние ее на распределение поля под полюсами. Принимая во внимание, что общий поток, а потому и насыщение полюсов, уменьшилось, мы можем сказать, что размагничивание от поперечно действующей обмотки будет с увеличением угла  $\beta$  убывать.



### 111. Форма кривой м. д. с. и магнитного поля, создаваемого якорем

Для выяснения характера и силы поля, создаваемого якорем (что необходимо для количественного учета реакции якоря в конкретных случаях), рассмотрим фиг. 164, на которой представлена развернутая в плоскость машина с гладким якорем, не имеющая добавочных полюсов. Проведем две бесконечно тонкие силовые трубки: одну через полюсы, якорь и ярмо (фиг. 164, а, трубка  $ABCD$ ), другую симметрично относительно оси полюса (фиг. 164, б, трубка  $A'B'C'D'$ ). М. д. с., создающая в трубке поток, будет по общему правилу определяться числом ампервитков, цепляющихся с трубкой. Где и как расположены другие части витков, в данном случае безразлично, важно лишь то, что они лежат не замкнутой силовой трубкой; поэтому можем сказать, что число цепляющихся с трубкой ампервитков будет определяться числом охватываемых трубкой амперпроводников, лежащих на окружности якоря.<sup>1</sup> При подсчете указанных амперпроводников необходимо, конечно, учесть, что на дуге  $AM$  (фиг. 164, а) ток по проводникам идет в одном направлении (от нас), по дуге  $MD$  — в обратном (к нам). Общее число амперпроводников выразится поэтому разностью амперпроводников на этих двух участках



Фиг. 164. Развернутая в плоскость машина с гладким якорем.

Имея равномерно распределенную обмотку, можно при достаточном числе активных проводников

$N$  считать число амперпроводников на дуге  $AM$  якоря пропорциональным числу амперпроводников, приходящихся на 1 пог. см окружности (обозначим эту величину через  $AS$ ), умноженному на длину дуги в см. Для рассматриваемой силовой трубки  $ABCD$  (фиг. 164, а) можем, таким образом, написать, что число сцепляющихся с нею амперпроводников (или, что то же, ампервитков) равно:

$$AS \cdot (\overline{AM} - \overline{MD}).$$

Здесь, согласно данному выше определению,

$$AS = \frac{N i_a}{\pi D},$$

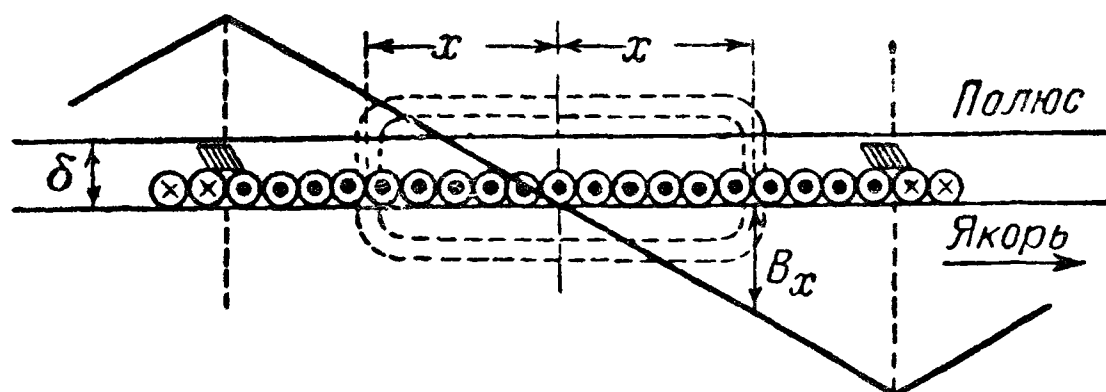
где  $i_a$  — ток в проводнике, равный  $i_a = I_a/2a$ ; следовательно,

$$AS = \frac{I_a N}{2a\pi D}. \quad (239)$$

Величина  $AS$  носит название линейной нагрузки якоря, пользование при расчетах этой величиной равносильно мысленной замене существующей обмотки равномерным слоем меди, имеющим на 1 пог. см длины окружности якоря «объем тока», выражаемый формулой (239).

<sup>1</sup> Полюсы предполагаем невозбужденными.

Вследствие симметрии трубки  $ABCD$  относительно охватываемых амперпроводников, индукции в точках  $A$  и  $D$  должны быть равны, но взаимно противоположны. Так как, однако, для этой трубки  $\overline{AM} = \overline{MD}$ , то результирующая м. д. с. равна нулю, а следовательно, и индукции в точках  $A$  и  $D$  равны нулю.



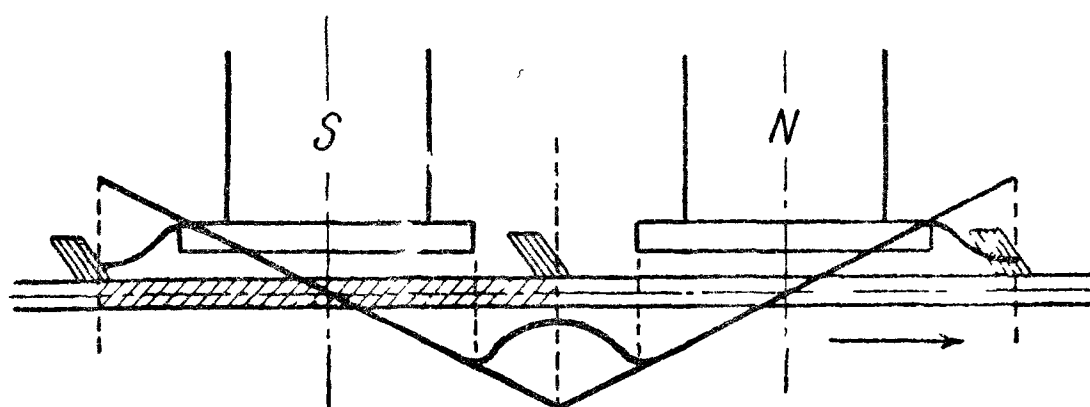
Фиг. 165. Развернутая в плоскость машина с равномерным воздушным зазором.

Вычислим теперь индукцию в точках, отстоящих на расстоянии  $x$  от оси полюсов (фиг. 164, б). Если пренебречь магнитным сопротивлением трубки в частях, расположенных в железе, то тогда все магнитное сопротивление ее сведется к магнитному сопротивлению двойного воздушного зазора ( $2\delta$ ). В таком случае мы можем воспользоваться формулой (70), выведенной выше для ампервитков двойного воздушного зазора в случае гладкого якоря (§ 54).

$$AW_{\delta} = 1,6 \delta B_{\delta}.$$

Следовательно, индукция в отмеченных точках определится так:

$$B_x = \frac{AW_{\delta}}{1,6 \delta} = \frac{2xAS}{1,6 \delta} = \frac{AS}{0,8 \delta} x, \quad (240)$$



Фиг. 166. Искажение кривой поля якоря в промежутке между полюсами.

т. е. будет прямо пропорциональной расстоянию  $x$ , иначе говоря, индукция возрастает по прямой линии, проходящей через точку  $A$ .

Если бы якорю противостояли не полюсы, разделенные большими и глубокими промежутками, а сплошной слой ненасыщенного железа (фиг. 165), то, очевидно, кривая индукции, создаваемой м. д. с. якоря, имела бы треугольную форму с вершиной треугольника над щеткой.

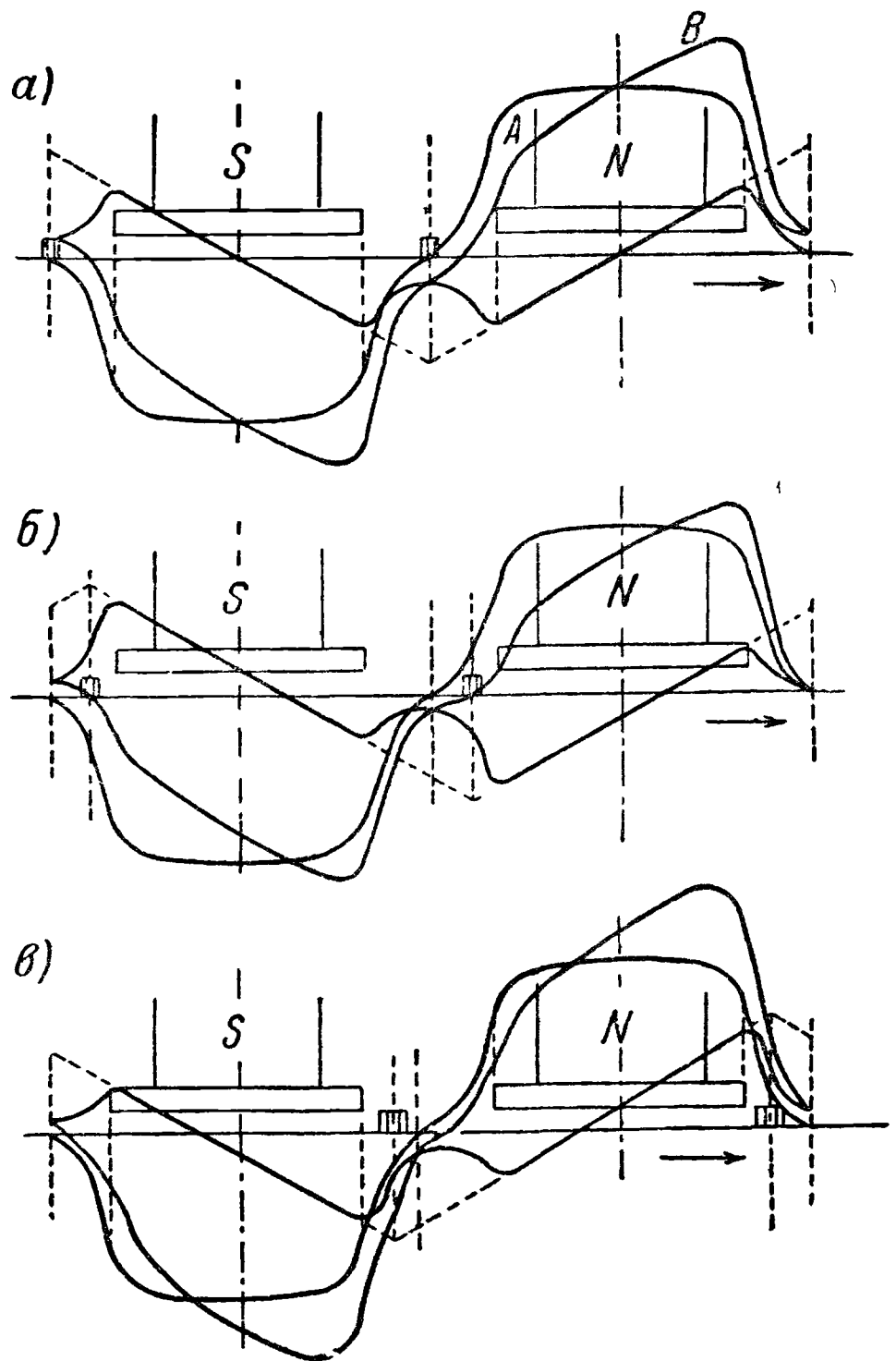
В обычных же ненасыщенных машинах с явно выраженными полюсами кривая индукции будет иметь прямолинейную форму только там, где имеем полюсные башмаки. В промежутках же, между полюсными башмаками, поле обмотки якоря получит искаженную форму, как это показано на фиг. 166.

## 112. Результирующее магнитное поле машины без добавочных полюсов

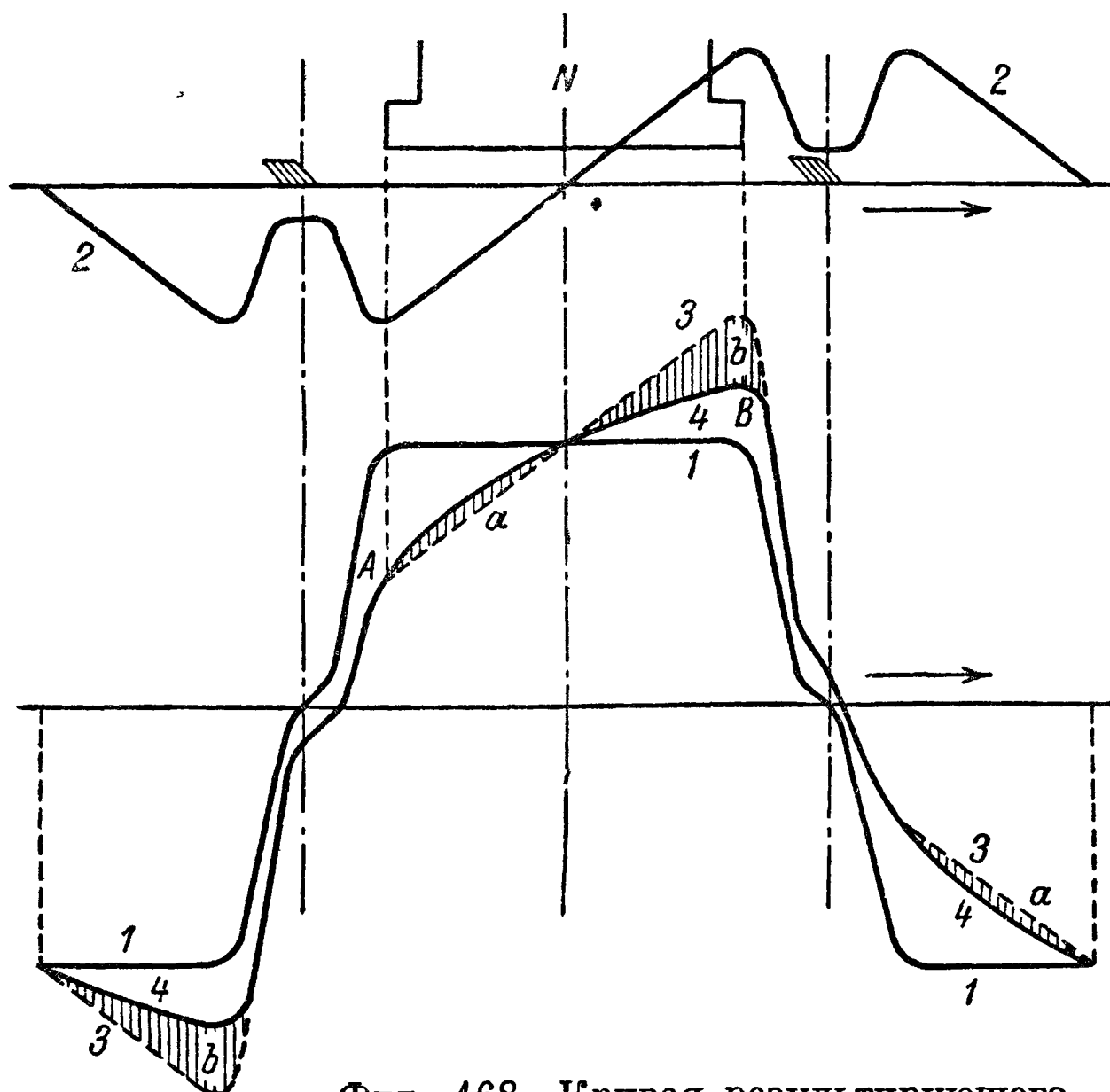
Суммируя кривые магнитных полей полюсов и якоря, мы получим кривую результирующего магнитного поля. На фиг. 167 сделаны соответствующие построения для трех положений щеток ненасыщенного генератора, а именно:

на фиг. 167, *а* — при щетках, стоящих на геометрической магнитной нейтрали; на фиг. 167, *б* — при щетках, несколько сдвинутых с геометрической магнитной нейтрали в направлении вращения генератора; на фиг. 167, *в* — при щетках, сдвинутых против направления вращения генератора.

Суммирование магнитных полей допустимо только при полном отсутствии насыщения. При наличии насыщения действительная форма кривой магнитного поля будет отличаться от только что полученных, и тем значительнее, чем больше насыщение. Так, на фиг. 168 вместо результирующей кривой 3, представляющей сумму кривых 1 и 2, мы получим другую, вроде той, которая представлена на этой фигуре кривой 4. В тех местах, где м. д. с. вычитаются, мы получим индукцию, несколько бóльшую, но зато в тех местах, где м. д. с. складываются, индукция получается значительно меньшей. На фиг. 167, *а* для ненасыщенного генератора площадь результирующей кривой магнитного поля между двумя щетками (вследствие того, что щетки стоят на геометрической магнитной нейтрали) равна площади кривой основного магнитного поля. На фиг. 168 такого равенства уже не существует: площадь



Фиг. 167. Построение кривых магнитных полей, полюсов, якоря и результирующего поля при различных положениях щеток на коллекторе.

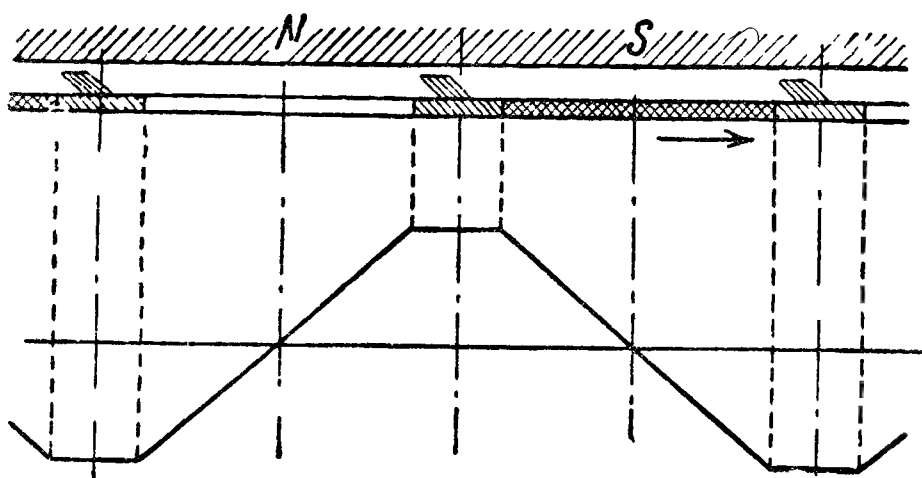


Фиг. 168. Кривая результирующего поля машины при наличии насыщения

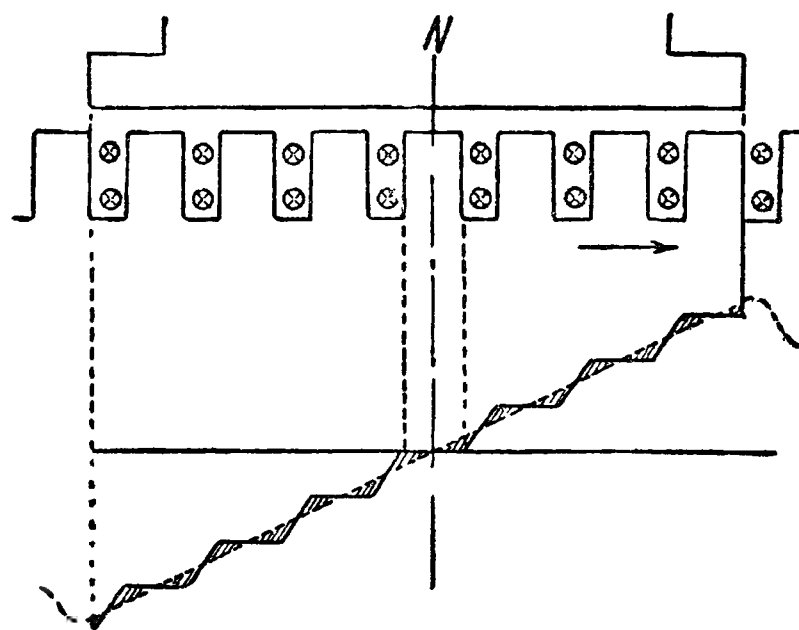
кривой 4 результирующего магнитного поля меньше площади кривой 1 основного магнитного поля, так как добавочная площадка  $a$  меньше площадки  $b$ , которая отнимается от пунктирной кривой 3, соответствующей результирующему магнитному полю в ненасыщенной машине.

### 113. Влияние на форму кривой магнитного поля якоря укорочения шага обмотки якоря и якорных зубцов

Вышеуказанный треугольный характер поле якоря получается только в случае диаметальной обмотки на гладком якоре. Если обмотка хордовая, то в зоне коммутации получаем пазы, в которых токи в нижнем и верхнем слоях обмотки направлены в противоположные стороны. Вследствие этого кривая м. д. с. получит вместо треугольной трапецевидную форму (фиг. 169). Верхнее основание трапеции зависит от укорочения шага (§ 81).



Фиг. 169. Кривая м. д. с. якоря при укороченном шаге обмотки



Фиг. 170. Ступенчатая кривая поля якоря при наличии зубцов

В якорях зубчатых мы не имеем равномерного слоя обмотки, вследствие чего кривая поля приобретает ступенчатый характер (фиг. 170). Это поле, однако, можно мыслить разложенным на прямолинейное, показанное на фигуре пунктиром, и добавочные поля, замыкающиеся вокруг впадин; на фиг. 170 эти поля заштрихованы. Прямолинейное поле вычисляется по линейной нагрузке, но вместо  $\delta$  теперь надлежит брать  $\delta_1 = \delta k_\delta$ . Добавочными же полями можем пренебречь.

### 114. Добавочные полюсы как средство для улучшения коммутации

Из изложенного в § 110 мы убедились в том, что с увеличением нагрузки генератора постоянного тока реакция якоря возрастает, а с этим увеличивается и сдвиг физической магнитной нейтрали в направлении вращения генератора. Для получения удовлетворительной (безискровой) коммутации генератора нужно сдвинуть в том же направлении (т. е. в направлении вращения генератора) щетки на коллекторе, притом сдвиг щеток должен быть тем больше, чем больше нагрузка генератора. Очевидно, что такое передвижение щеток сделало бы необходимым неусыпный надзор за щетками, что практически сделало бы эксплуатацию генератора неприемлемой. Поэтому на практике щетки устанавливают в положении, наиболее благоприятном для нагрузки, равной  $2/3$  или  $3/4$  номинальной, и так рассчитывают генератор, чтобы при нагрузках, больших и меньших, чем эта нагрузка, щетки работали удовлетворительно.

В середине 80-х годов прошлого века был предложен другой способ улучшения коммутации, который в настоящее время применяется во всех машинах постоянного тока, начиная, практически, с мощности в 0,5 *квт*. Этот способ состоит в том, что щетки устанавливают в неизменном положении, а именно.



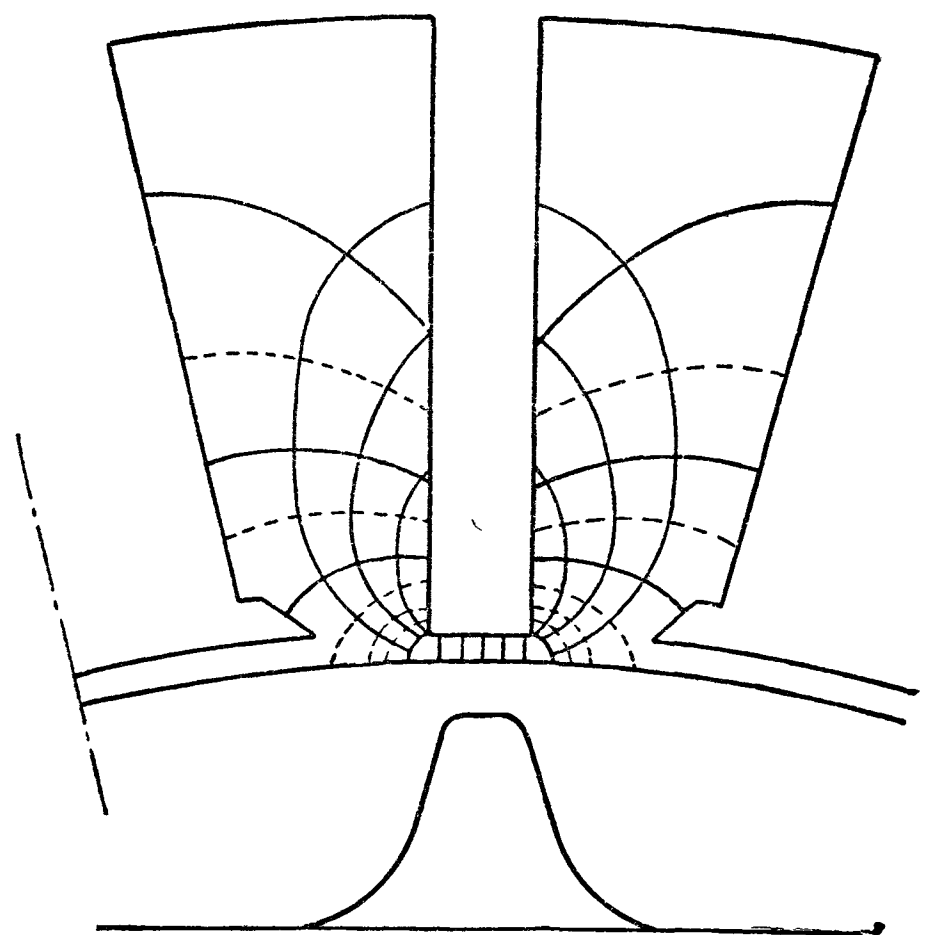
на геометрической магнитной нейтрали машины, и снабжают машину добавочными полюсами, установленными на этой нейтрали. Добавочные полюсы намагничиваются обмоткой, соединенной последовательно с цепью якоря, и эта обмотка так рассчитывается, чтобы в зоне коммутации (т. е. на узкой дуге окружности якоря, на которой происходит переключение секций якорной обмотки из одной параллельной ветви обмотки в другую) уничтожать поле реакции якоря и создавать, кроме того, такое добавочное магнитное поле, чтобы от перерезывания его коммутируемыми секциями якорной обмотки в них индуктировались э. д. с., компенсирующие э. д. с. самоиндукции коммутируемых секций якорной обмотки. Если магнитную цепь добавочных полюсов сделать ненасыщенной, то тогда поле добавочных полюсов будет изменяться пропорционально с нагрузкой, что как раз и требуется.

### 115. Магнитные поля генератора с добавочными полюсами

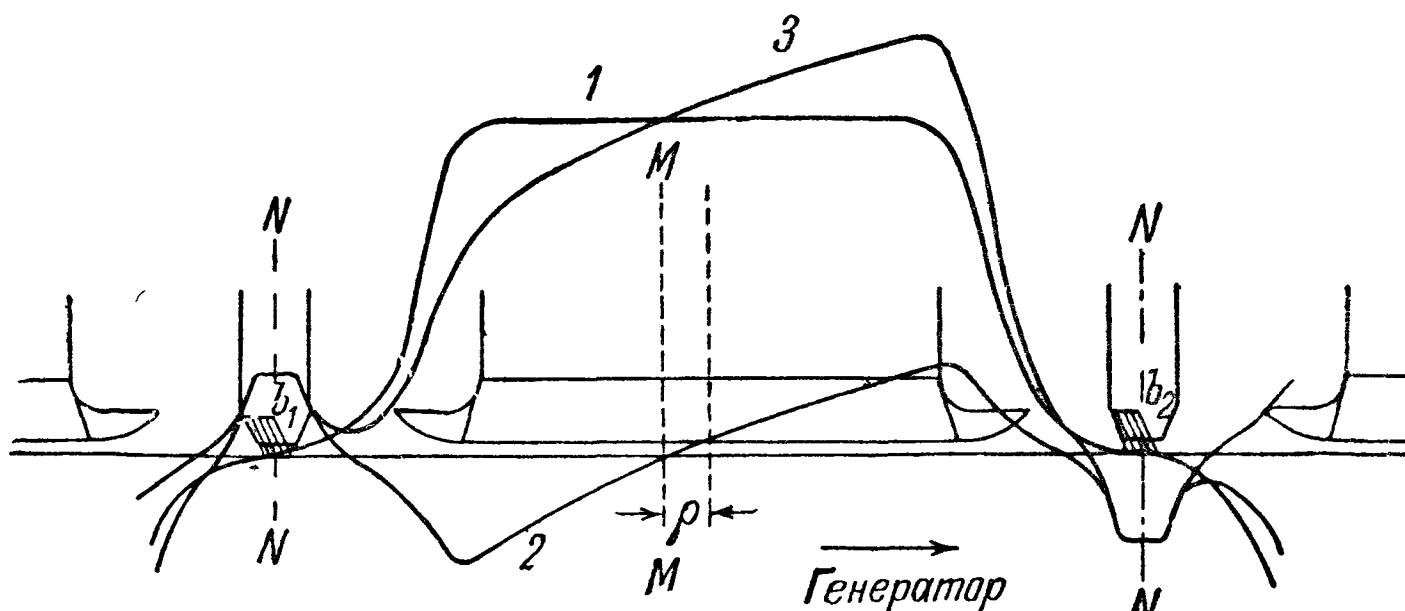
Пользуясь методом, ранее рассмотренным в § 51, можем построить картину распределения магнитного поля добавочных полюсов (фиг. 171). При построении этого поля сделано предположение, что токов в обмотке главных полюсов и в обмотке якоря нет, а через обмотку добавочных полюсов пропущен постоянный ток от независимого источника.

Так как под влиянием реакции якоря основное поле якоря сдвигается сторону вращения генератора, то при вращении якоря вправо и при направлениях магнитных потоков основных магнитных полюсов и якоря, показанных на фиг. 172, поле добавочного полюса, имеющегося по левую сторону от оси главного северного полюса, должно быть направлено так же, как и под северным главным полюсом. Иначе говоря, при правом вращении якоря генератора слева от главного северного магнитного полюса должен быть северный магнитный добавочный полюс.

Совмещая на одной фигуре все три магнитных поля: 1) основное магнитное поле, 2) поле якоря и 3) поле добавочных магнитных полюсов, получим картину, представленную на фиг. 172. Суммируя все три магнитных поля,



Фиг. 171. Картина распределения магнитного поля добавочного полюса.

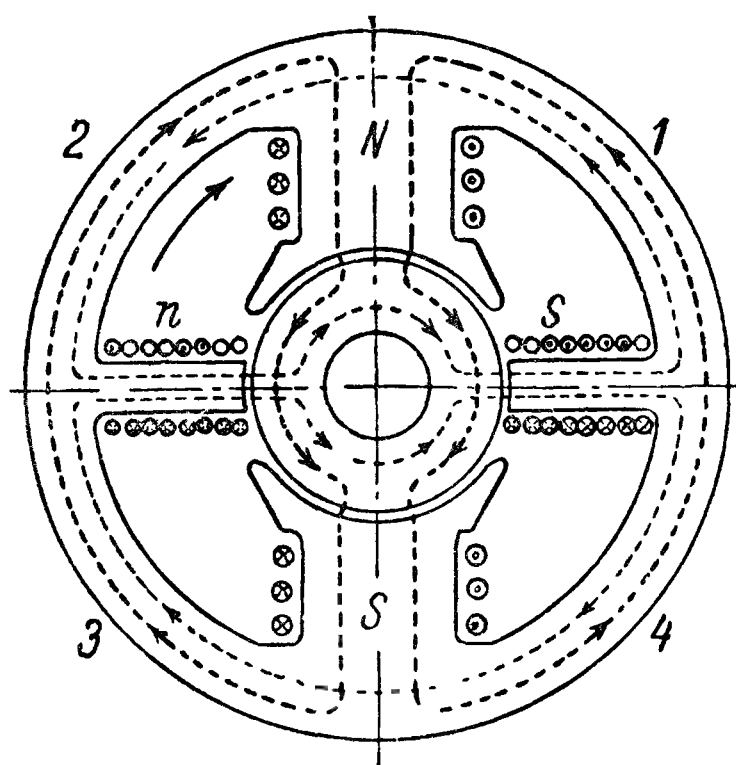


Фиг. 172. Кривые полей якоря, главных и добавочных полюсов, а также результирующего поля.

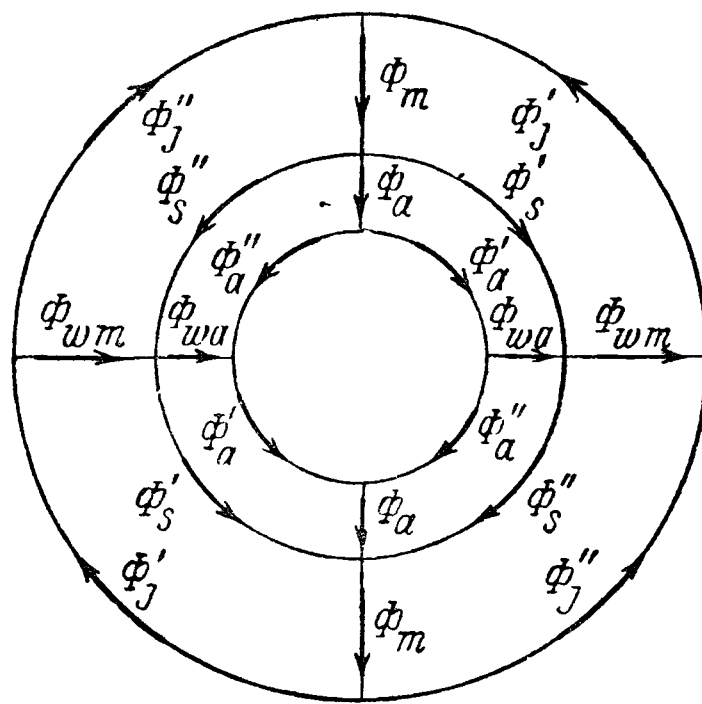
получим результирующее магнитное поле генератора постоянного тока, снабженного добавочными полюсами. На фиг. 172 кривая 2 получена сложением кривой магнитного поля якоря и поля добавочных магнитных полюсов; кривая 1 представляет основное магнитное поле, а кривая 3 — результирующее магнитное поле. При построении кривой 2 учтено насыщение машины, а потому нейтральная точка кривой 2 лежит не на оси полюса, а смещена относительно нее на расстояние  $\rho$ , определяемое размагничивающей составляющей  $AW$  поперечно действующих ампервитков якоря (см. далее).

#### 116. Влияние добавочных магнитных полюсов на основное магнитное поле машины постоянного тока

а) Влияние насыщения совпадающих участков магнитных путей. На фиг. 173 дан схематический поперечный разрез двухполюсной машины постоянного тока с добавочными магнитными полюсами. Жирным пунктиром показан путь основного магнитного потока машины при невозбужденных добавочных магнитных полюсах. Так как разность магнитных потенциалов ярма и якоря по середине между главными магнитными полюсами равна нулю, то в сердечниках добавочных магнитных полюсов в рассматриваемом случае никакого магнитного потока не будет. Точно так же, если возбудить только добавочные магнитные полюсы, то весь их магнитный поток будет замыкаться помимо сердечников главных магнитных полюсов, как это показано на фиг. 173 тонким пунктиром.



Фиг. 173. Поперечный разрез двухполюсной машины постоянного тока с добавочными полюсами.



Фиг. 174. Картина магнитных потоков.

Из фиг. 173 следует, что ярмо и якорь являются общими участками пути обоих магнитных потоков. Если насыщение этих участков магнитных путей невелико, то картину распределения в машине магнитных потоков при одновременном возбуждении как главных, так и добавочных магнитных полюсов мы получим путем наложения обоих магнитных потоков; при этом в двух квадрантах (на фиг. 173 в 1 и 3) мы получим сумму, в двух других (на фиг. 173 во 2 и 4 квадрантах) — разность обоих магнитных потоков.

Фиг. 174 дает схематическую картину магнитных потоков в ненасыщенной машине. При построении ее учтено, что: 1) по условиям симметрии магнитные потоки в 1 и 3 квадрантах должны быть одинаковы, так же как и магнитные потоки во 2 и 4 квадрантах; 2) магнитные потоки, входящие в какое-нибудь сечение, должны быть равны магнитным потокам, выходящим из этого сечения. Таким образом, можем написать:

$$\begin{aligned} \Phi_j' + \Phi_j'' &= \Phi_m; & \Phi_a' + \Phi_a'' &= \Phi_a; \\ \Phi_j' - \Phi_j'' &= \Phi_{wm}; & \Phi_a' - \Phi_a'' &= \Phi_{wa}. \end{aligned}$$

откуда получаем.

$$\left. \begin{aligned} \Phi_j' &= \frac{1}{2} (\Phi_m + \Phi_{um}), & \Phi_a' &= \frac{1}{2} (\Phi_a + \Phi_{wa}), \\ \Phi'' &= \frac{1}{2} (\Phi_m - \Phi_{um}), & \Phi_a'' &= \frac{1}{2} (\Phi_a - \Phi_{wa}). \end{aligned} \right\} \quad (241)$$

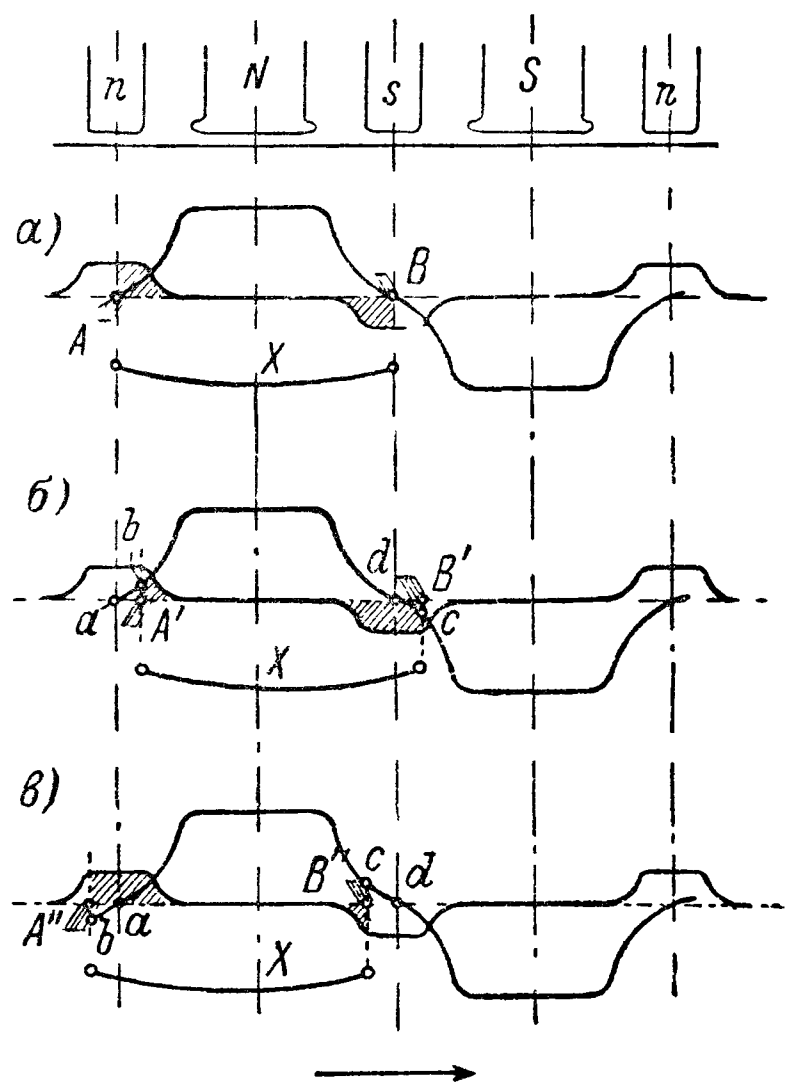
Эти соотношения выведены в предположении, что ярмо и сердечник якоря не насыщены. В действительности некоторое насыщение всегда имеется, а потому наличие добавочных магнитных полюсов всегда влечет за собой некоторое уменьшение основного магнитного потока машины, а следовательно, вызывает некоторое дополнительное падение напряжения машины. Последнее, однако, практически при индукциях, допускаемых в ярме и в сердечнике якоря, столь незначительно, что им мы можем пренебречь. По этой причине расчет главной магнитной цепи машины, снабженной добавочными магнитными полюсами, можно производить так же, как и машины, не имеющей добавочных магнитных полюсов.

**б) Влияние сдвига щеток с геометрической магнитной нейтрали** В приведенном рассуждении мы исходили из предположения, что щетки стоят строго на геометрической магнитной нейтрали, как это требуется для машины, снабженной добавочными магнитными полюсами.

Если щетки по какой-либо причине окажутся сдвинутыми из этого положения, то в машине, работающей генератором, получится дополнительное изменение напряжения, вызываемое добавочными магнитными полюсами, в чем можно убедиться рассматривая фиг. 175. На этой фигуре вычерчены кривые магнитных полей главных и добавочных магнитных полюсов генератора постоянного тока при нагрузке, причем сделано предположение, что машина снабжена еще компенсационной обмоткой, которая, как будет показано в § 127, уничтожает магнитное поле якоря, вследствие чего основное магнитное поле при нагрузке не претерпевает практически никакого искажения.

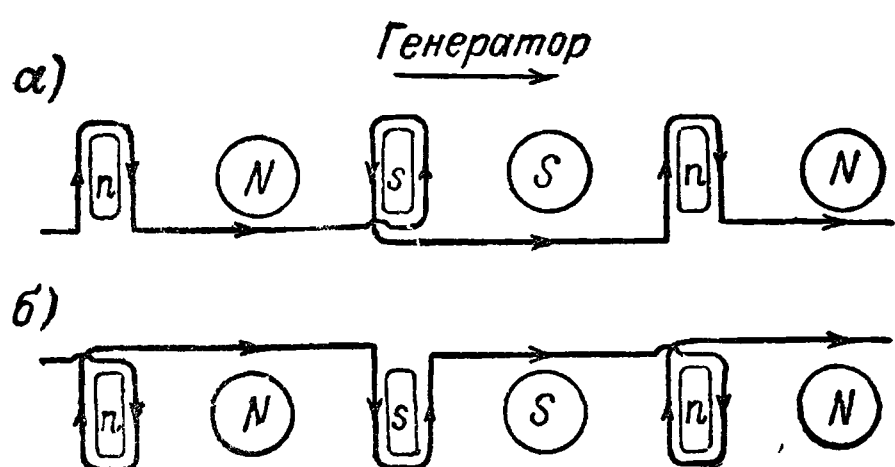
Как указывалось в § 87, э. д. с., индуктируемая между смежными щетками, пропорциональна магнитному потоку, охватываемому короткозамкнутой секцией якорной обмотки. На фиг. 175, а предположено, что якорная обмотка выполнена с диаметральной шагом и что щетки стоят на геометрической магнитной нейтрали. В этом случае магнитный поток, охватываемый короткозамкнутой секцией якорной обмотки, определяется площадью кривой основного магнитного поля, так как заштрихованные площадки кривой магнитного поля добавочных магнитных полюсов взаимно компенсируются.

На фиг. 175, б щетки сдвинуты с магнитной нейтрали в направлении вращения генератора, вследствие этого короткозамкнутая секция якорной обмотки охватывает уже не весь магнитный поток главных полюсов, а меньший, определяемый площадью кривой между ординатами  $A'$  и  $B'$ . Кроме того, из фиг. 175, б видно, что отрицательная заштрихованная площадка кривой магнитного поля добавочных полюсов теперь больше положительной заштрихованной площадки, следовательно, добавочные магнитные полюсы будут в этом случае уменьшать магнитный поток, охватываемый короткозамкнутой секцией якорной обмотки, т. е. будут размагничивать машину.

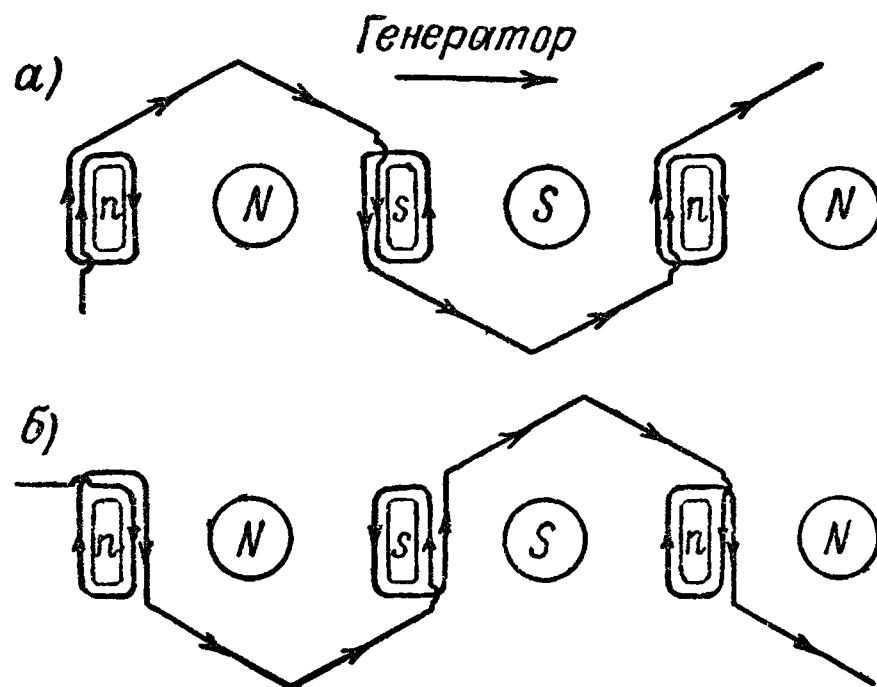


Фиг. 175. Кривые магнитных полей главных и добавочных полюсов

На фиг. 175, в щетки сдвинуты с магнитной нейтрали на такой же угол как и на фиг. 175, б, но против направления вращения генератора; короткозамыкаемая секция якорной обмотки охватывает такую же часть основного магнитного потока, как и на фиг. 175, б, т. е. уменьшенную; но теперь добавочные полюсы, как нетрудно усмотреть из фиг. 175, в, не только компенсируют это уменьшение, но создают еще увеличение магнитного потока, охватываемого короткозамыкаемой секцией, по сравнению со значением его, когда щетки стояли на геометрической магнитной нейтрали (фиг. 175, а). Таким образом, при сдвиге щеток с магнитной нейтрали в сторону, противоположную направлению вращения генератора, добавочные магнитные полюсы подмагничивают машину.<sup>1</sup>



Фиг. 176 Соединения добавочных полюсов одной торцевой стороны машины.



Фиг. 177. Соединения добавочных полюсов с двух торцевых сторон машины

Резюмируя выводы, можем сказать, что, поскольку не будет нарушаться коммутация тока, можно воспользоваться сдвигом щеток в генераторе постоянного тока как для уменьшения в нем падения напряжения, так и для его увеличения. Такое увеличение падения напряжения в генераторе при нагрузке бывает в некоторых случаях необходимым, например, когда он работает параллельно с аккумуляторной батареей и желательно, чтобы толчки нагрузки воспроизводились батареей, а не генератором, однако такой сдвиг нежелателен по другим соображениям.

в) Влияние соединений катушек добавочных магнитных полюсов. На величину магнитного потока главных магнитных полюсов могут оказать влияние соединения катушек добавочных магнитных полюсов друг с другом, если эти соединения выполнены без учета нижеприводимых соображений.

На фиг. 176 и 177  $N$  и  $S$  в кружках обозначают главные, а прямоугольники  $n$  и  $s$  — добавочные магнитные полюсы; кроме того, на фигурках показаны катушки добавочных магнитных полюсов вместе с их соединениями, причем на фиг. 176 все соединения сделаны с одного и того же торца генератора, а на фиг. 177 — с обоих торцов. Сравнивая фиг. 176 с 177, легко убеждаемся в том, что соединения, выполненные с разных торцов машины (фиг. 177), образуют по отношению к главным магнитным полюсам полувитки, которые действуют на северные и южные главные полюсы одинаковым образом, т. е. создавая либо дополнительное намагничение (фиг. 177, а), либо дополнительное размагничение (фиг. 177, б). Соединения по фиг. 176, а, б, т. е. выполненные с одного торца машины, влияют на главные магнитные полюсы в противоположных направлениях, а потому на величину основного магнитного потока могут оказать лишь ничтожное влияние — только за счет изменения магнитной проницаемости сердечников главных магнитных полюсов.

<sup>1</sup> Как увидим ниже (§ 120), в двигательном режиме работы машины сдвиг щеток с магнитной нейтрали в ту или другую сторону оказывает противоположный эффект, чем в генераторе



Такое же влияние, как и соединения друг с другом катушек добавочных магнитных полюсов, могут оказывать и соединения последовательной обмотки возбуждения, если машина имеет смешанное возбуждение. Однако это влияние становится ощутительным только тогда, когда дополнительные ампервитки, создаваемые соединениями, достигают заметной величины, а именно 5% — в случае соединений катушек последовательной возбуждающей обмотки и 10% — в случае соединений катушек добавочных магнитных полюсов [Л 15]

## Б. УЧЕТ РЕАКЦИИ ЯКОРЯ В МАШИНЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ НАГРУЗКЕ ЕЕ ГЕНЕРАТОРОМ

### 117. Учет влияния продольно действующих ампервитков якоря

Если в работающей машине щетки сдвинуты из нейтрального положения на угол  $\beta$ , то соответствующая этому углу дуга окружности якоря

$$b_c = \pi D \frac{\beta}{360}.$$

Продольно действующие ампервитки якоря тогда выразятся формулой

$$AW_g = 2 \cdot b_c AS. \quad (242)$$

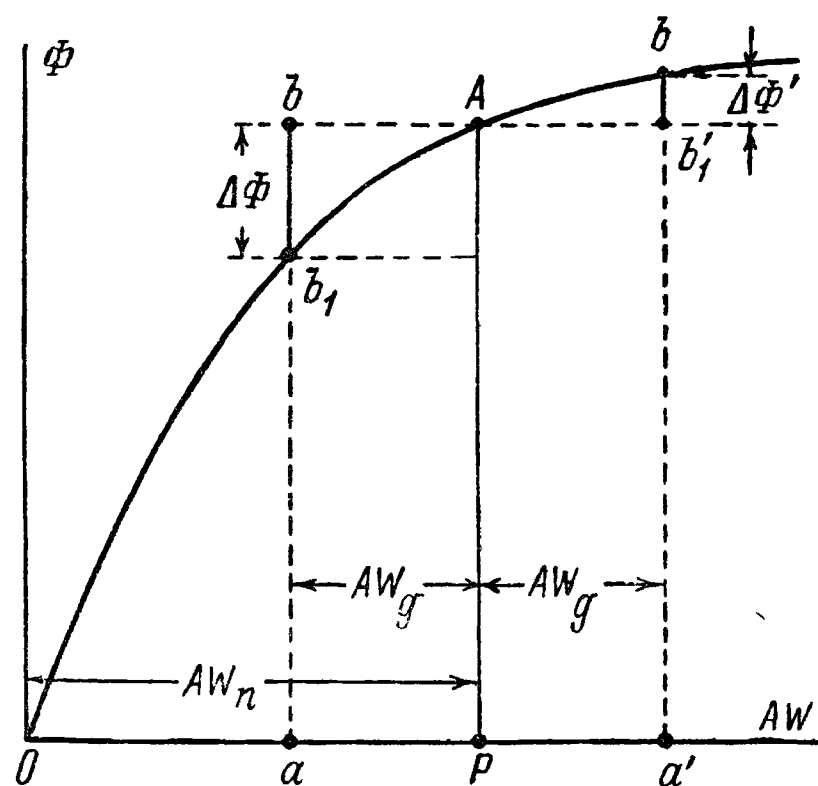
Эти ампервитки при генераторной работе машины, как мы видели, будут размагничивающими или намагничивающими в зависимости от направления дуга щеток с нейтральной.

Угол  $\beta$ , определяющий  $b_c$ , выбирается с таким расчетом, чтобы получить надлежащее для коммутации поле. По данным опыта, достаточно сдвинуть щетки настолько, чтобы при холостом ходе индукция в зоне коммутации равнялась 1000—2000 гс. Если машина возбуждена хордовой обмоткой, имеющей значительное укорочение, то угол  $\beta$  можно брать меньше. Если машина возбуждена добавочными полюсами, то щетки обычно стоят на геометрической магнитной нейтрали. Тогда  $b_c = 0$ , следовательно, и  $AW_g = 0$ .

Отложим на оси абсцисс характеристики холостого хода машины (фиг. 178) ампервитки  $AW_n$  возбуждения при нагрузке. По характеристике находим соответствующее значение потока, который машина имела бы при холостом ходе ( $\overline{AP}$ ). Вследствие наличия в работающей машине размагничивающих ампервитков  $AW_g$  поток машины будет определяться теперь разностью ампервитков  $AW_n - AW_g$  и выразится отрезком  $\overline{ab_1}$ .

Если бы мы сдвинули щетки против вращения на тот же угол, то продольно действующие ампервитки  $AW_g$  были бы теперь намагничивающими. Поток машины определился бы ампервитками  $AW_n + AW_g$  и был бы больше потока  $\Phi = \overline{AP}$  на  $\Delta\Phi' = \overline{b'b_1'}$ .

Такой сдвиг щеток (против вращения) в машине, работающей генератором, применяется, однако, редко. Сдвигая щетки в генераторе по вращению, мы должны, если желаем сохранить поток  $\Phi = \overline{AP}$ , сообщить обмотке возбуждения дополнительные ампервитки, компенсирующие продольно действующие ампервитки якоря  $AW_g$ .



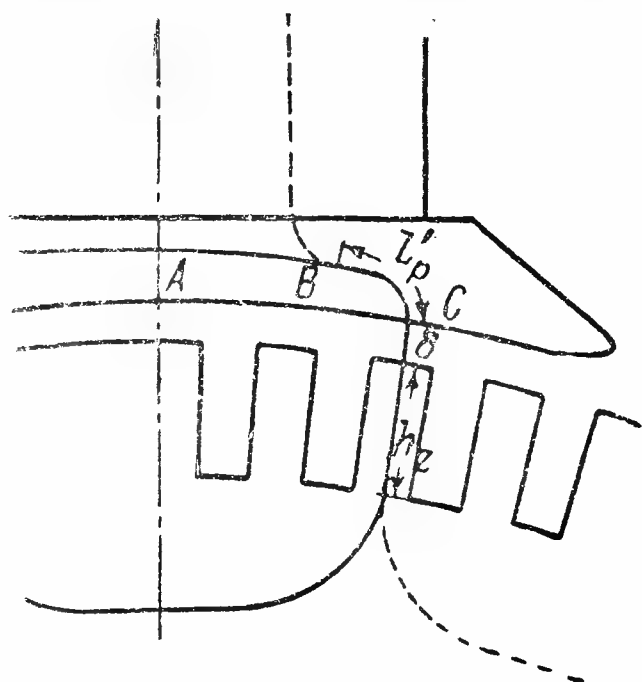
Фиг. 178. Построение для учета влияния продольно действующих ампервитков якоря.

## 118. Учет влияния поперечно действующих ампервитков якоря

Величина поперечно действующих ампервитков якоря на пару полюсов вычисляется по формуле:

$$AW_q = (\tau - 2b_c) AS. \quad (243)$$

Эти ампервитки создают искажение поля, вследствие которого магнитное сопротивление сбегающего края полюса возрастает, набегающего — ослабевает, но общее магнитное сопротивление потоку всего полюса увеличивается. Поэтому мы можем сказать, что в насыщенной машине поперечно действующие ампервитки создают некоторое размагничивающее действие, т. е. получается



Фиг. 179. Путь потока якоря при невозбужденных полюсах.

как бы увеличение продольно действующих размагничивающих ампервитков реакции якоря. Эти добавочные размагничивающие ампервитки мы обозначим через  $AW_c$  и назовем размагничивающей составляющей поперечно действующих ампервитков якоря.

Если мы хотим, чтобы поток, входящий в якорь, остался без изменения, то, очевидно, в нагруженной машине необходимо произвести усиление возбуждения полюсов на величину  $AW_c$ .

**а) Способ Арнольда.** Учет ампервитков  $AW_c$  может быть произведен путем применения так называемой переходной характеристики.

На фиг. 179 сплошной прямой показан средний путь магнитных линий потока якоря при невозбужденных полюсах. Путь можно разбить на 4 участка: первый из них —  $ABC$  — идет поперек полюсного башмака, второй — через зазор  $\delta$ , третий — через зубцы высотой  $h_z$  и четвертый — в якорь. Магнитное сопротивление первого и четвертого участков по сравнению с сопротивлением второго и третьего относительно невелико, и мы им пренебрегаем. Взяв из данных расчета главной магнитной цепи машины при холостом ходе ряд значений  $B_\delta$  и соответствующие им ампервитки  $AW_\delta$  и  $AW_z$ , построим (фиг. 180) кривую:

$$B_\delta = f\left(\frac{AW_\delta + AW_z}{2}\right).$$

Так как поток  $\Phi_a$ , входящий из полюса в якорь, пропорционален  $B_\delta$ , то

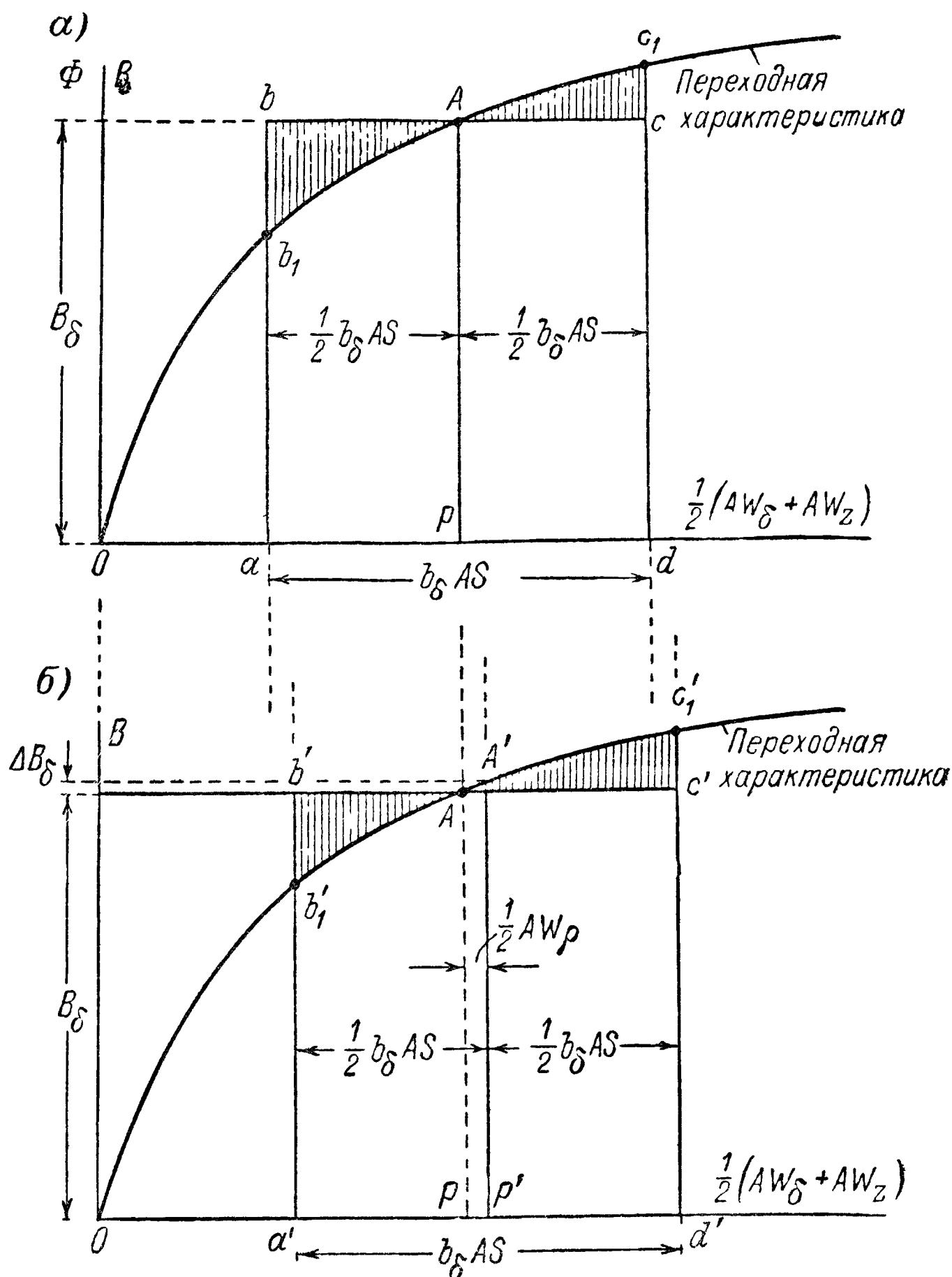
$$\Phi_a = B_\delta b_\delta l_\delta;$$

та же кривая представляет (в пересчитанном масштабе) зависимость этого потока от ампервитков, нужных для проведения потока из полюсов в якорь. Кривую (фиг. 180) называют переходной характеристикой.

Проведем на фиг. 180 прямую, параллельную оси абсцисс через значение  $B_\delta$ , соответствующее э. д. с. холостого хода  $E_0$ . Опустив из точки  $A$  — пересечения прямой с характеристикой — перпендикуляр  $\overline{AP}$ , получаем соответствующие ампервитки  $\overline{OP}$ .

Действительную картину распределения магнитного поля под полюсами мы свели (§ 54) к прямоугольнику с основанием  $b_\delta$ , а потому для нахождения интересующих нас ампервитков  $AW_c$  нам достаточно рассмотреть из общего числа поперечно действующих ампервитков  $AW_q$ , определяемых формулой (243), лишь те, которые лежат под полюсом на дуге  $b_\delta$ , т. е. ампервитки  $b_\delta \cdot AS$ . При одинаковом зазоре  $\delta$  под всем полюсом мы получаем, что на каждый из концов полюсного наконечника действует  $\frac{1}{2} b_\delta AS$  ампервитков.

Поэтому, если возбуждение машины оставить без изменения, то для сбегающего конца полюсного башмака получим  $\overline{OP} + \frac{1}{2} b_\delta AS$ , а для набегающего  $\overline{OP} - \frac{1}{2} b_\delta AS$  ампервитков. Нетрудно видеть, что отрезок кривой (на фиг. 180, а), заключенный между точками  $b_1$  и  $c_1$ , дает нам распределение индукции, а следовательно, представляет собой отрезок кривой поля под полюсом при нагрузке.



Фиг. 180 Переходные характеристики и определение размагничивающего влияния поперечных ампервитков якоря

Площадь четырехугольника  $abcd$  на фиг. 180, а пропорциональна  $b_\delta \cdot B_\delta$ , так как высота его равна  $B_\delta$ , а основание равно  $b_\delta AS$ ; иными словами, эта площадь может служить мерой потока  $\Phi_a$ , входящего в якорь при холостом ходе:  $\Phi_a = b_\delta \cdot B_\delta \cdot l_\delta$ .

Из фиг. 180, а видно, что при нагрузке поток сохранится без изменения только в том случае, если площадь  $ab_1Ac_1d$  будет равна площади  $abAcd$ ; для этого должно выполняться равенство заштрихованных площадок  $b_1bA$  и  $Ac_1c$ . На фиг. 180, а это равенство, очевидно, не выполняется. Для восстановления равенства поступаем следующим образом: взяв циркулем расстояние  $ad = b_\delta AS$ , передвигаем его по оси абсцисс вправо до тех пор, пока не получим равенство площадок (фиг. 180, б):

$$b_1'b'A = Ac_1'c'$$

Расстояние между прямыми  $\overline{AP}$  и  $\overline{A'P'}$  на фиг. 180, б, измеренное в ампер-витках, и даст, очевидно,  $\frac{1}{2} AW_e$ , таким образом, можем написать, что

$$AW_e = 2\overline{PP'}. \quad (244)$$

Итак, для того чтобы при нагрузке поток, входящий в якорь, сохранил требуемое значение, необходимо, чтобы ампервитки машины, рассчитанные на одну магнитную цепь, были увеличены на  $AW_e$ .

На фиг. 180, б отрезок  $\overline{P'A'}$  дает индукцию под серединой полюса при сбрасывании нагрузки. Она больше индукции в зазоре, имеющейся при холостом ходе, на величину

$$\Delta B_\delta = \overline{P'A'} - \overline{PA}.$$

Под набегающим концом полюсного башмака мы получаем индукцию, которая меньше индукции, имеющейся под серединой полюса, на величину

$$\Delta B_{\delta'} = \overline{a'b'} - \overline{a'b_1'} = \overline{b_1'b'}.$$

Под сбегающим концом полюсного башмака индукция, наоборот, будет больше, чем под серединой полюса, на величину

$$\Delta B_{\delta''} = \overline{d'c_1'} - \overline{d'c'} = \overline{c'c_1'}.$$

Чтобы под набегающим концом полюсного башмака индукция

$$B_{\delta \min} = \overline{a'b_1'}$$

не упала до нулевого значения, нужно, чтобы на рис. 180, б отрезок

$$\overline{a'P} = \frac{1}{2} b_\delta AS - \frac{1}{2} AW_e = \frac{1}{2} (b_\delta AS - AW_e)$$

был не больше ампервитков холостого хода:

$$\overline{OP} = \frac{1}{2} (AW_\delta + AW_z),$$

г. е. должно выполняться неравенство.

$$\frac{1}{2} (b_\delta AS - AW_e) \geq \frac{1}{2} (AW_\delta + AW_z)$$

или

$$AW_\delta + AW_z \leq b_\delta AS - AW_e.$$

Очевидно, что неравенство усилится, если напишем:

$$AW_\delta + AW_z \leq b_\delta AS,$$

что равносильно условию

$$\frac{AW_\delta + AW_z}{b_\delta AS} \leq 1.$$

Введя обозначение

$$\frac{AW_\delta + AW_z}{b_\delta AS} = k_q, \quad (245)$$

можем сказать, что расчет магнитной цепи машины желательно вести таким образом, чтобы  $k_q$  было не меньше единицы <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Для ряда специальных электрических машин, работающих при переменной скорости вращения, приходится допускать  $k_q < 1$

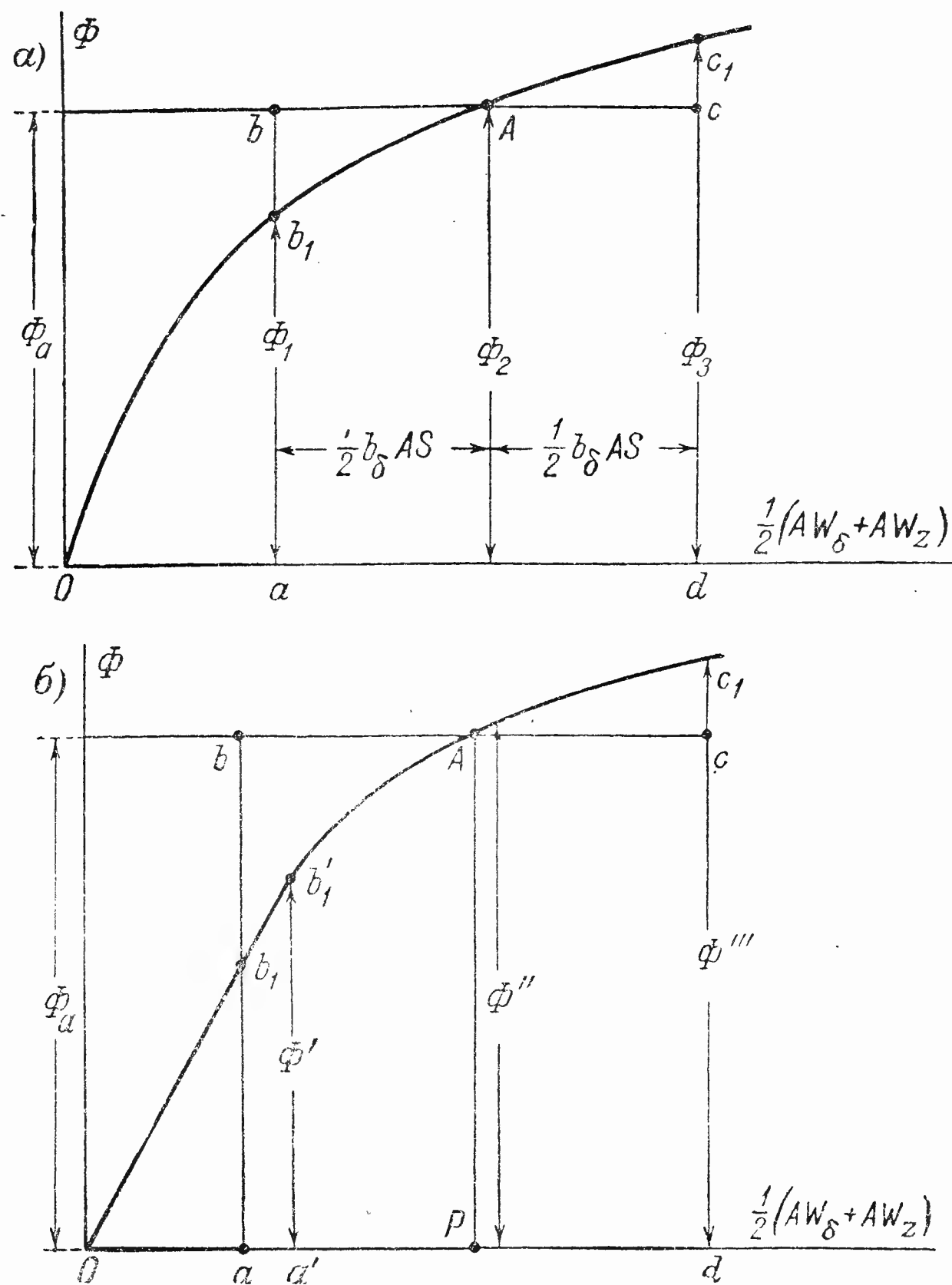




Отсюда находим:

$$\Delta\Phi = \Phi_a \left( \frac{\overline{b_2 b_3}}{4 \overline{ab}} \right). \quad (247)$$

На эту величину нужно увеличить высоту прямоугольника  $abcd$  — это будет высота  $\overline{ab'}$ , тогда горизонтальная линия  $b'c'$  пересечет переходную характеристику в точке  $A_1$ , опустив из которой перпендикуляр на ось абсцисс найдем величину  $\frac{1}{2} AW_e$ , а следовательно, и  $AW_e$ .



Фиг. 182. Определение  $AW_p$  по способу Г. Н. Петрова.

Из фиг. 181 нетрудно усмотреть, что в случаях, когда точка  $A$  лежит на начальной прямоугольной части переходной характеристики, реакция якоря невелика. Она достигает максимума, когда точка  $A$  лежит на перегибе переходной характеристики, а затем реакция якоря вновь уменьшается и становится равной нулю, когда  $A$  лежит в насыщенной части переходной характеристики, где эта характеристика вновь почти прямолинейна.

**б) Способ Г. Н. Петрова.** Другой способ был предложен Г. Н. Петровым. Способ состоит в непосредственном определении уменьшения  $\Delta\Phi$  магнитного потока при нагрузке, равного площади  $ab_1Ac_1d$ , по сравнению с его значением при холостом ходе, равным площади  $abcd$ :

$$\Delta\Phi = \text{пл. } abcd - \text{пл. } ab_1Ac_1d = \overline{ad} \cdot \overline{ab} - \text{пл. } ab_1Ac_1d.$$

Используя правило Симпсона, можно вычислить площадь  $ab_1Ac_1d$  по трем ординатам:  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  и  $\Phi_3$  (фиг. 182, а), где  $\Phi_2$  — ордината средней точки  $A$ :

$$\text{пл. } ab_1Ac_1d = \frac{4\Phi_2 + \Phi_1 + \Phi_3}{6} \cdot \overline{ad}.$$

Тогда

$$\Delta\Phi = \overline{ad} \left[ \overline{ab} - \frac{4\Phi_2 + \Phi_1 + \Phi_3}{6} \right]. \quad (248)$$

Нужно отметить, что в предложенном виде способ Петрова может дать верный результат лишь в случае, когда все три ординаты ( $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  и  $\Phi_3$ ) лежат на криволинейной части переходной характеристики, которая выражается кривой второго порядка, так как только в этом случае можно пользоваться правилом Симпсона. Если ордината  $\Phi_1$  лежит на начальной прямолинейной части характеристики, то площадь  $ab_1Ac_1d$  нужно разбить для вычисления на две части, а для этого от площади  $ab_1Ac_1d$  нужно отделить и вычислить по соответствующей формуле площадь трапеции  $ab_1b_1'a'$  (фиг. 182, б), а остальную площадь фигуры, ограниченной сверху кривой, вычислить по формуле Симпсона. Для этого по фиг. 182 нужно найти значения крайних ординат  $\Phi'$  и  $\Phi'''$  и ординату средней точки  $\Phi''$  (фиг. 182, б).

#### 119. Расчет главной магнитной цепи машины постоянного тока при нагрузке ее генератором

Обозначая э. д. с., индуктированную в обмотку якоря при нагрузке, через  $E_b$ , можем для напряжения на зажимах машины в общем случае написать:

$$U = E_b - I_a(R_a + R_s + R_w), \quad (249)$$

где  $R_a$  — сопротивление обмотки якоря;

$R_s$  — сопротивление последовательной обмотки;

$R_w$  — сопротивление обмотки добавочных полюсов.

Если имеем дело с шунтовой машиной, то  $R_s = 0$ , а тогда

$$U = E_b - I_a(R_a + R_w). \quad (250)$$

Как увидим ниже, падение напряжения в контакте щеток не зависит от силы тока, поэтому уточнения ради формулы (250) можно переписать так:

$$U = E_b - I_a(R_a + R_w) - 2\Delta U, \quad (251)$$

где  $2\Delta U$  — падение напряжения в контакте щеток обеих полярностей.

Из (251) следует, что при нагрузке машины в ее якоре должна индуктироваться э. д. с.

$$E_b = U + I_a(R_a + R_w) + 2\Delta U.$$

Для создания этой э. д. с. потребуется поток (§ 87)

$$\Phi_b = \frac{a 60}{N_{pn}} E_b \cdot 10^8. \quad (252)$$

Полные размагничивающие ампервитки реакции якоря будут

$$AW_r = AW_g + AW_e.$$

Снабдив обозначения ампервитков, потребных для проведения потока  $\Phi_b$  через отдельные участки магнитной цепи, индексами  $b$ , можем для коэффициента рассеяния при нагрузке  $\sigma_b$  написать:

$$\sigma_b = 1 + \frac{2(AW_{\delta b} + AW_{zb} + AW_{ab} + AW_r)}{\Phi_b} A. \quad (253)$$

Это можно переписать так:

$$\sigma_b = 1 + \frac{2(AW_{\delta b} + AW_{zb} + AW_{ab})}{\Phi_b} \Lambda + \frac{2AW_r}{\Phi_b} \Lambda. \quad (254)$$

Если машина мало насыщена, то отношение

$$\frac{2(AW_{\delta b} + AW_{zb} + AW_{ab})}{\Phi_b}$$

будет близко к аналогичному отношению для холостого хода:

$$\frac{2(AW_{\delta_0} + AW_{z_0} + AW_{a_0})}{\Phi_0},$$

а тогда первые два члена в (254) будут представлять коэффициент рассеяния при холостом ходе, а потому получаем, что для слабо насыщенной машины

$$\sigma_b \approx \sigma_0 + \frac{2AW_r}{\Phi_b} \Lambda. \quad (255)$$

Таким образом, даже в случае слабо насыщенной машины коэффициент рассеяния при нагрузке должен быть больше, чем при холостом ходе.

Полное число ампервитков на одну магнитную цепь для случая нагруженной машины напишется так:

$$AW_{kb} = AW_{\delta b} + AW_{zb} + AW_{ab} + AW_{mb} + AW_b + AW_r. \quad (256)$$

Для всей же машины получим:

$$AW_{ib} = p AW_{kb}. \quad (257)$$

## В. ДВИГАТЕЛЬНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 120. Реакция якоря при работе машины постоянного тока двигателем

В § 110 мы видели, что в машине постоянного тока, работающей генератором, реакция якоря сдвигает физическую магнитную нейтраль в направлении вращения генератора. При тех же направлениях тока якоря и тока в обмотке возбуждения в машине, работающей двигателем, магнитный поток будет, естественно, сдвигаться в том же направлении, однако при этом направление вращения двигателя будет обратное, чем в генераторе.

Изменение направления вращения в двигательном режиме работы машины постоянного тока обуславливается тем, что, при изменении направления тока в якоре и магнитного потока полюсов, электромагнитный момент, обусловленный взаимодействием тока и потока, имеет одно и то же направление в обоих режимах. В генераторном режиме момент первичного двигателя, приводящего генератор во вращение, преодолевает электромагнитный момент. Машина вращается в направлении, противоположном действию электромагнитного момента. В двигательном режиме, наоборот, электромагнитный момент является ведущим, преодолевая тормозной момент, приложенный к валу со стороны привода. Машина вращается по направлению действия электромагнитного момента.

Вследствие обратного направления вращения в двигательном режиме сдвиг магнитной нейтрали будет теперь сдвигом против направления вращения.

Таким образом, чтобы щетки в двигателе, не имеющие добавочных полюсов, не искрили при нагрузке, их нужно сдвигать с геометрической магнитной нейтрали против вращения якоря.

Очевидно, что чем больше нагрузка двигателя, т. е. чем больше ток якоря, тем больше реакция якоря и тем больше сдвигается против вращения



якоря магнитная нейтраль, а поэтому тем больше должен быть сдвиг с геометрической нейтрали щеток на коллекторе. Практически, конечно, постоянное регулирование положения щеток на коллекторе в зависимости от нагрузки, т. е. от тока якоря, является невозможным. По этой причине в двигателях без добавочных полюсов щетки устанавливают в положении, которое является наименее выгодным в коммутационном отношении для нагрузки, равной, примерно,  $\frac{2}{3}$  или  $\frac{3}{4}$  номинальной нагрузки. При этом двигатель должен быть рассчитан так, чтобы при нагрузках, больших и меньших, чем указанная, на коллекторе не наблюдалось такого искрения, которое может его повредить.

Из сказанного следует, что если параллельная машина, не имеющая добавочных полюсов, должна переходить от двигательной работы к генераторной и обратно, то она должна быть в коммутационном отношении так рассчитана, чтобы в ней щетки могли все время оставаться на геометрической магнитной нейтрали. В самом деле, если бы мы закрепили щетки в положении, наиболее благоприятном для некоторой средней генераторной нагрузки, то при переходе к двигательной работе, при которой направление вращения сохраняется, щетки оказались бы сдвинутыми в несоответствующую сторону, и машина начала бы сильно искрить.

#### 121. О двигателях постоянного тока с добавочными магнитными полюсами

В двигателях с добавочными магнитными полюсами, так же как и в генераторах с добавочными магнитными полюсами, щетки, вообще говоря, должны стоять строго по геометрической магнитной нейтрали. Очевидно, что при тех же направлениях тока в обмотке якоря и в обмотке возбуждения направление тока в катушках добавочных магнитных полюсов при двигательной работе должно быть таким же, как и при генераторной, но так как направление вращения при двигательной работе будет обратным направлению вращения при работе генератором, то для полярности добавочных магнитных полюсов двигателя получаем следующее правило: добавочный магнитный полюс в двигателе должен иметь такую же полярность, как и основной полюс, расположенный рядом с ним в направлении, обратном вращению двигателя.

Рассмотрим, как будет происходить в параллельной машине с добавочными магнитными полюсами переход от генераторной работы к двигательной. Так как при этом переходе направление тока в якоре изменится на обратное, то и направление сдвига магнитной нейтрали изменится на обратное, в связи с чем потребуются и изменение направления потока добавочных магнитных полюсов, но такое изменение происходит автоматически, так как обмотка добавочных полюсов включается последовательно с обмоткой якоря. Таким образом, при наличии добавочных магнитных полюсов параллельная машина должна работать в коммутационном отношении при переходе от генераторной работы к двигательной, и обратно, вполне удовлетворительно. При этом мы предполагаем, что щетки стоят строго на геометрической магнитной нейтрали. Если бы по каким-либо причинам щетки оказались сдвинутыми с геометрической магнитной нейтрали, то при переходе от генераторной работы к двигательной влияние сдвига щеток с нейтрали будет обратное тому, какое имеет место в генераторе, а именно: в двигателе с добавочными магнитными полюсами при сдвиге щеток с геометрической магнитной нейтрали в направлении вращения мы получаем усиление, а при сдвиге против вращения — ослабление основного магнитного потока машины.

Вследствие этого, сдвигая щетки в направлении вращения якоря, можно уменьшить, а сдвигая в обратную сторону, увеличить скорость вращения двигателя. При этом, однако, нужно иметь в виду, что, если щетки сдвинуты про-

тив вращения якоря и ослабляющее влияние потока добавочных полюсов. Если основной магнитный поток достаточно велико, то при небольших нагрузках параллельного двигателя могут возникнуть качания, которые, пока не были выяснены причины этого явления, вызывали большие неприятности на практике (гл. IX, § 214).

## 122. О вращающем электромагнитном моменте машины постоянного тока

При установившемся режиме работы машины постоянного тока мы имеем дело с процессом преобразования энергии, а именно: а) либо механической энергии, подводимой посторонним двигателем к валу машины постоянного тока, в электрическую энергию, отдаваемую машиной в эл. сеть, приключенную к внешним зажимам машины (в случае генераторного режима работы б) либо с обратным преобразованием энергии, а именно электрической энергии, подводимой из эл. сети к внешним зажимам машины, в механическую энергию, передаваемую валу машины (в случае двигательного режима работы).

Для осуществления этого энергопреобразовательного процесса необходимо иметь в машине два вращающих момента, взаимно уравновешивающих друг друга по закону действия и противодействия: один — за счет механических сил, прилагаемых к валу машины, — назовем его *механическим вращающим моментом*, другой — за счет электромагнитных сил, возникающих на роторе и поэтому называемый *электромагнитным вращающим моментом*. Выведем выражение для электромагнитного вращающего момента, исходя из уравнения равновесия э. д. с. в якорной цепи.

Пусть  $U$  — напряжение на зажимах машины,  $E_b$  — э. д. с., индуцируемая в якорной обмотке при нагрузке,  $I_a R_\Sigma$  — сумма падений напряжения в цепи якоря, где  $I_a$  — ток якоря,  $R_\Sigma$  — сумма всех сопротивлений, последовательно включенных в цепи якоря (сопротивление обмотки якоря  $R_a$ , сопротивление последовательной возбуждающей обмотки (если она имеется)  $R_s$ , обмотки добавочных магнитных полюсов  $R_w$ , компенсационной  $R_c$  и переходного контакта щеток  $R_b$ ).

Уравнение равновесия э. д. с. напишется так.

$$U = E_b \mp I_a R_\Sigma; \quad (258)$$

здесь в правой части знак минус — в случае генераторной, знак плюс — в случае двигательной работы машины.

Умножим выражение (258) на  $I_a$ :

$$UI_a = E_b I_a \mp I_a^2 R_\Sigma. \quad (259)$$

Здесь  $UI_a$  — эл. мощность на зажимах машины,  $I_a^2 R_\Sigma$  — потеря мощности на джоулев эффект в цепи якоря,  $E_b I_a$  — электромагнитная мощность. Последнюю можно выразить через электромагнитный момент вращения  $M_D$  и угловую скорость вращения машины  $\Omega$ :

$$E_b I_a = M_D \Omega. \quad (260)$$

Подставляя в (260)

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60},$$

получим

$$M_D = \frac{E_b I_a}{\Omega} = \frac{60}{2\pi n} E_b I_a. \quad (261)$$

Если  $E_b$  выражено в вольтах, ток  $I_a$  — в амперах, скорость вращения  $n$  — в об/мин, то  $M_D$  получится в джоулях. Выражая  $M_D$  в  $\kappa\Gamma\text{м}$ , нужно правую часть (261) разделить на  $g = 9,81$ :

$$M_D = \frac{60}{9,81 \cdot 2\pi n} E_b I_a [\kappa\Gamma\text{м}].$$

Обозначая через  $P_a = E_b I_a$  — электрическую мощность машины, получаем:

$$M_D = 0,973 \frac{P_a}{n},$$

где  $P_a$  — в ваттах.

### 123. Работа машины постоянного тока без возбуждения

При рассмотрении реакции якоря в машине постоянного тока было установлено, что в генераторном режиме работы при сдвиге щеток с геометрической магнитной нейтрали по вращению якоря реакции якоря действует размагничивающим образом, поэтому по оси полюса мы получаем магнитный поток:

$$\Phi_b = \Phi_n - \Delta\Phi, \quad (262)$$

где  $\Phi_n$  — магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения, а  $\Delta\Phi$  — добавочный магнитный поток от реакции якоря. При сдвиге щеток в генераторе против направления вращения получаем намагничивающее действие реакции якоря:

$$\Phi_b = \Phi_n + \Delta\Phi. \quad (263)$$

Те же выражения (262) и (263) получаем и при двигательной работе машины, но при сдвигах щеток в обратных направлениях. Таким образом, сдвигая в генераторе щетки против направления вращения якоря, а в двигателе по направлению вращения, мы получим намагничивание машины по оси полюсов. По этой причине, отключив в двигателе постоянного тока обмотку возбуждения от источника питания, мы сохраним направление вращающего момента двигателя, и он будет продолжать вращаться в ту же сторону, если развиваемый им момент вращения будет достаточным для преодоления тормозящего момента.

В этом можно убедиться опытным путем на небольшом двигателе при его холостом ходе от пониженного напряжения, т. е. при небольшой скорости вращения. Соблюдение этих предосторожностей необходимо потому, что, хотя работа двигателем без возбуждений и возможна, но из-за нарушения условий коммутации (сдвиг щеток в ненадлежащую сторону) она будет протекать при сильном искрении щеток и большом значении тока якоря. Опыт нужно производить при холостом ходе двигателя, начиная с полного возбуждения при небольшом приложенном напряжении к якорю, т. е. при постоянной скорости вращения, и затем, постепенно уменьшая ток возбуждения, довести его до нуля. При этом скорость двигателя будет возрастать, и нужно наблюдать за тем, чтобы она не выходила за дозволенный предел (была не более чем на 20% выше номинальной) <sup>1</sup>

Двигатель постоянного тока, вращающийся без возбуждения, называется реактивным двигателем постоянного тока, т. е. двигателем, работающим за счет реакции якоря. Физическая возможность осуществить реактивный двигатель постоянного тока не может быть использована на практике из-за плохой коммутации тока и небольшого развиваемого им вращающего момента.

<sup>1</sup> ГОСТ 183-41, § 96

Аналогичными рассуждениями можно убедиться в физической возможности реактивного генератора постоянного тока и в его практической непригодности.

#### 124. Расчет главной магнитной цепи машины постоянного тока при нагрузке ее двигателем

Такой расчет производится так же, как и в случае работы машины генератором; нужно лишь учесть, что исходный при этом расчете результирующий магнитный поток  $\Phi_b$  определяется по э. д. с.  $E_b$ , которая в этом случае вычисляется по формуле для двигателя (258):

$$U = E_b + I_a R_\Sigma.$$

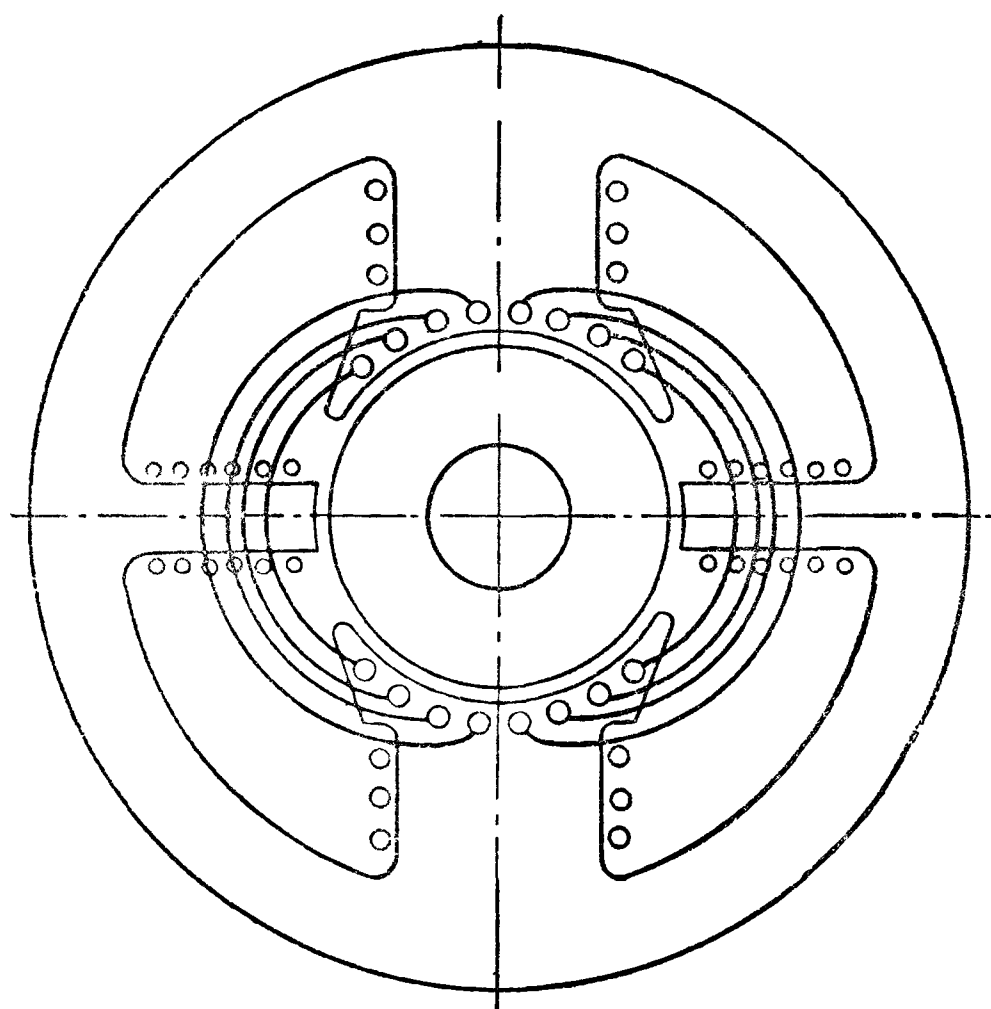
### Г. ЦЕЛЬ ПРИМЕНЕНИЯ В МАШИНЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА КОМПЕНСАЦИОННОЙ ОБМОТКИ

#### 125. Предварительное замечание

Как уже отмечалось, компенсированной машиной постоянного тока называется машина, снабженная компенсационной обмоткой, которая укладывается в пазах, специально проштампованных для нее в башмаках главных магнитных полюсов.

Компенсационная обмотка, предложенная в середине 80-х годов прошлого столетия одновременно с добавочными магнитными полюсами, первоначально предназначалась для улучшения коммутации тока, однако для этой цели она не может конкурировать с более простыми в выполнении и более дешевыми добавочными магнитными полюсами. Она применяется как средство борьбы с искажением основного магнитного поля из-за реакции якоря. Это иска-

жение в машинах постоянного тока, предназначенных для тяжелых условий работы, может повести к круговому огню на коллекторе (§ 131)



Фиг. 183. Конструктивная схема машины постоянного тока с компенсационной обмоткой.

#### 126. Нерациональность применения компенсационной обмотки как средства для улучшения коммутации

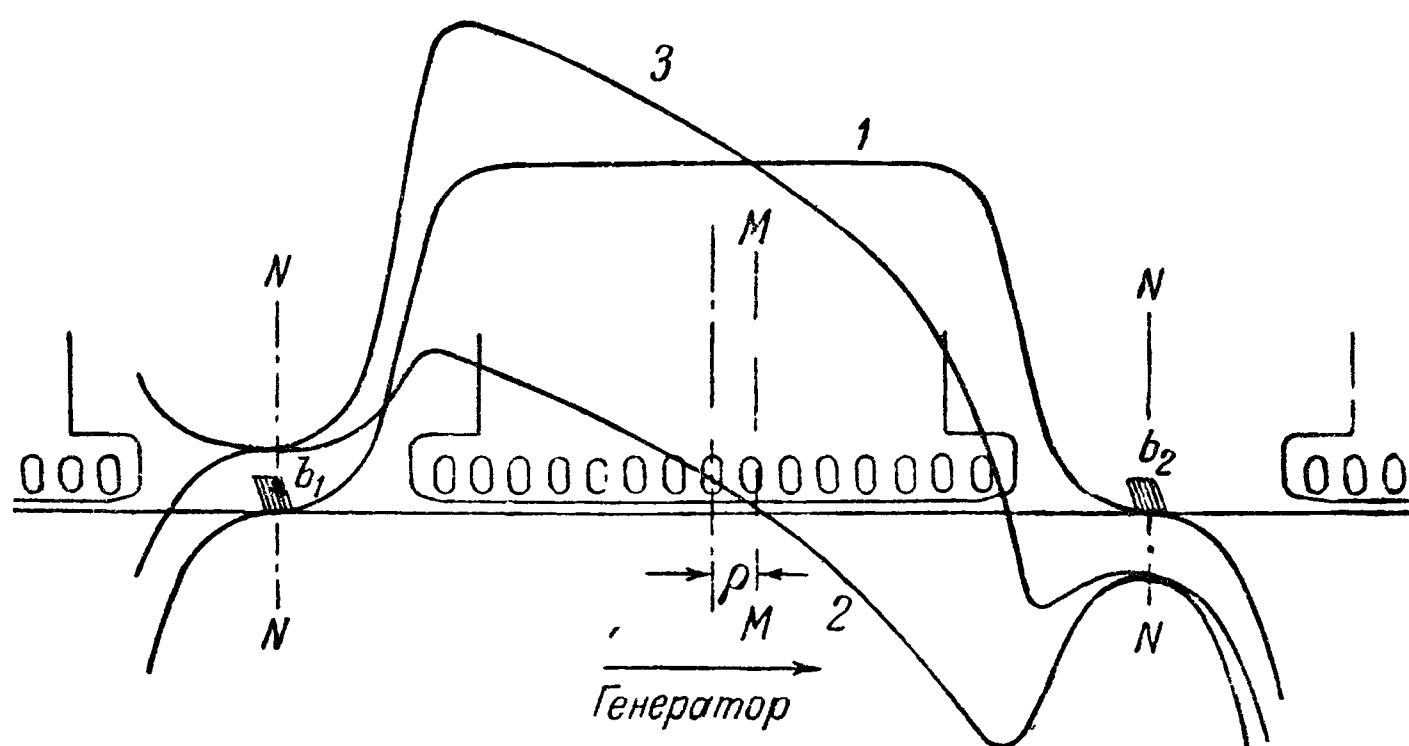
Как указывалось выше, при применении добавочных магнитных полюсов для улучшения коммутации тока обмотка добавочных полюсов должна создать поле, достаточное для уничтожения в зоне коммутации магнитного поля якоря, и дополнительное магнитное поле, от перерезывания которого коммутируемыми секциями якорной обмотки в них будут индуцироваться э. д. с., необходимые для компенсации э. д. с. самоиндукции секций.

Того же результата можно достигнуть и другим путем, а именно, устраивая в машине соответствующую компенсационную обмотку (фиг. 183). Такая компенсационная обмотка должна иметь такое число ампервитков, чтобы последние, за вычетом противодействующих ампервитков якоря, создавали в зоне коммутации надлежащее коммутирующее магнитное поле. Кривые полей



для такого генератора приведены на фиг. 184. Здесь 1 — основное магнитное поле, 2 — магнитное поле компенсационной обмотки после вычета поля якорной обмотки, 3 — результирующее поле.

Сравнивая фиг. 184 с 172, нетрудно заключить, что добавочные магнитные полюсы как средство улучшения коммутации тока имеют несомненное преимущество перед компенсационной обмоткой как средством для улучшения коммутации. Во-первых, средняя длина витка обмотки добавочных витков значительно меньше средней длины витка компенсационной обмотки с ее отогнутыми лобовыми частями (фиг. 183), а следовательно, получается экономия меди, во-вторых, изготовление обмотки, состоящей из катушек, надеваемых на узкие сердечники добавочных магнитных полюсов, много дешевле изготовления распределенной компенсационной обмотки, укладываемой в специальные пазы в полюсных башмаках



Фиг 184 Кривые полей генератора, снабженного компенса-  
ционной обмоткой

Компенсационная обмотка не применяется поэтому непосредственно для улучшения коммутации. Поскольку обмотка эта, как правило, выполняется в машинах постоянного тока совместно с дополнительными полюсами, то она влияет на улучшение коммутации косвенным образом, облегчая условия работы дополнительных полюсов, так как при наличии компенсационной обмотки уменьшается рассеяние магнитного потока этих полюсов; становится также меньшим насыщение сердечников.

**127. Компенсационная обмотка как средство борьбы с искажением формы результирующего магнитного поля машины при тяжелых условиях ее работы**

В некоторых типах эл. машин возникает необходимость бороться с искажением основного магнитного поля под влиянием реакции якоря, в особенности при значительных кратковременных перегрузках, в несколько раз превосходящих нормальную нагрузку машины.

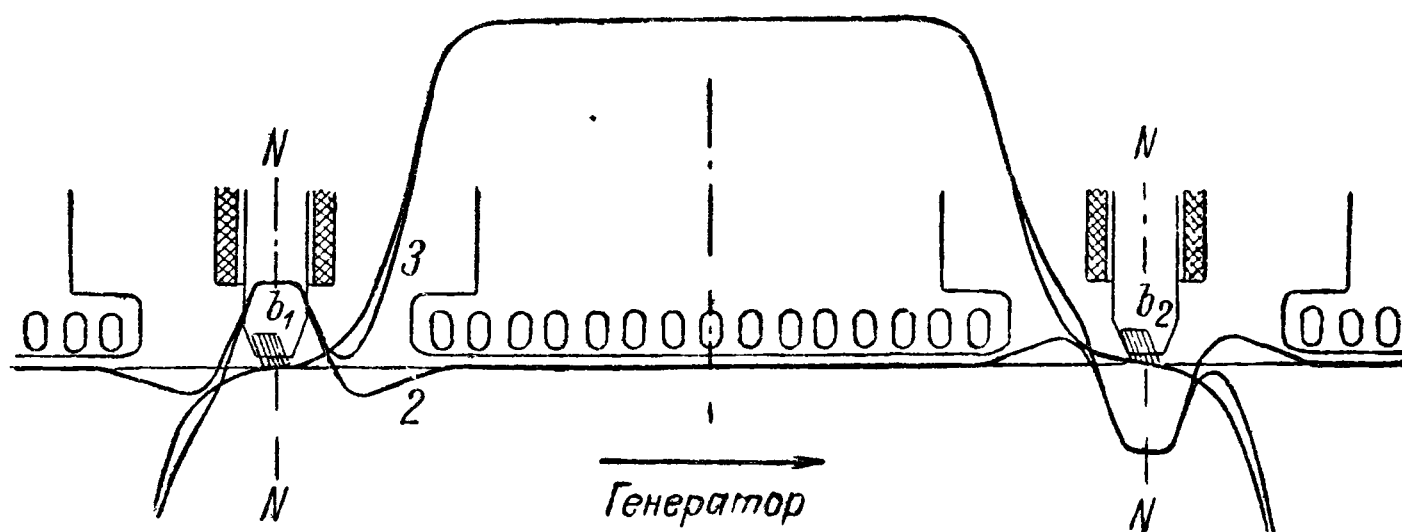
Искажение формы кривой распределения индукции в зазоре машины вызывает, как это будет пояснено более подробно в дальнейшем, увеличение э. д. с., индуктированных в секциях обмотки якоря при нахождении этих секций в тех местах, где индукция велика. Это ведет к увеличению разности потенциалов между соседними коллекторными пластинами, что может вызвать электрическую дугу между ними. Последняя может при определенных условиях перерасти в мощную электрическую дугу на коллекторе — так называемый «круговой огонь».

Компенсационная обмотка является незаменимым средством борьбы с искажением поля и ныне стала неотъемлемой частью ряда машин постоянного тока

Кривые магнитных полей машины при наличии добавочных полюсов компенсационной обмотки даны на фиг. 185

Приведем примеры машин постоянного тока, нуждающихся в применении компенсационной обмотки.

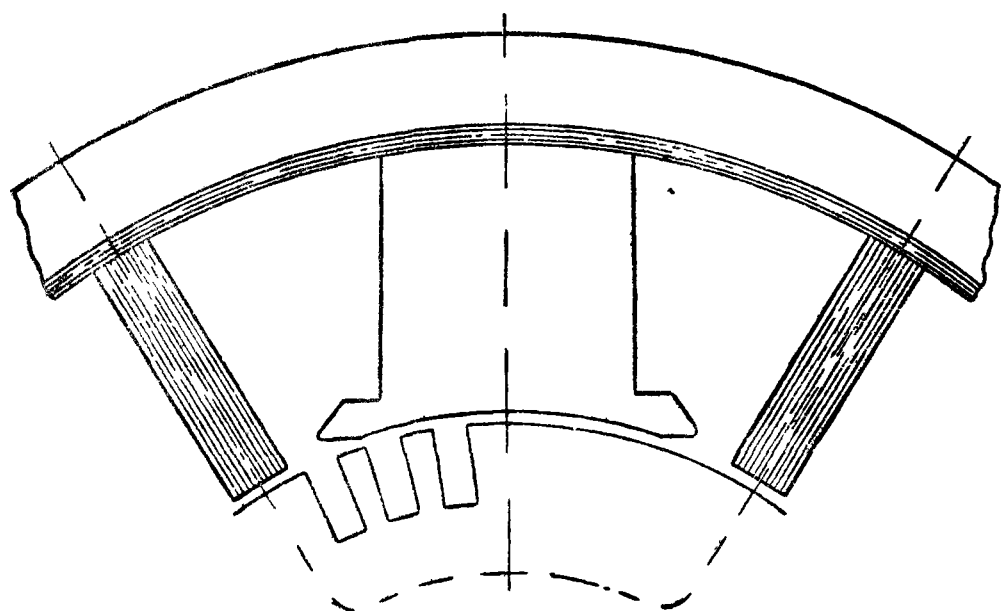
Двигатель постоянного тока, сочленяемый с реверсивным прокатным станом, должен выдерживать кратковременные пики нагрузки, в 2,5—3 раза (а иногда и больше) превосходящие номинальную. Применение компенса-



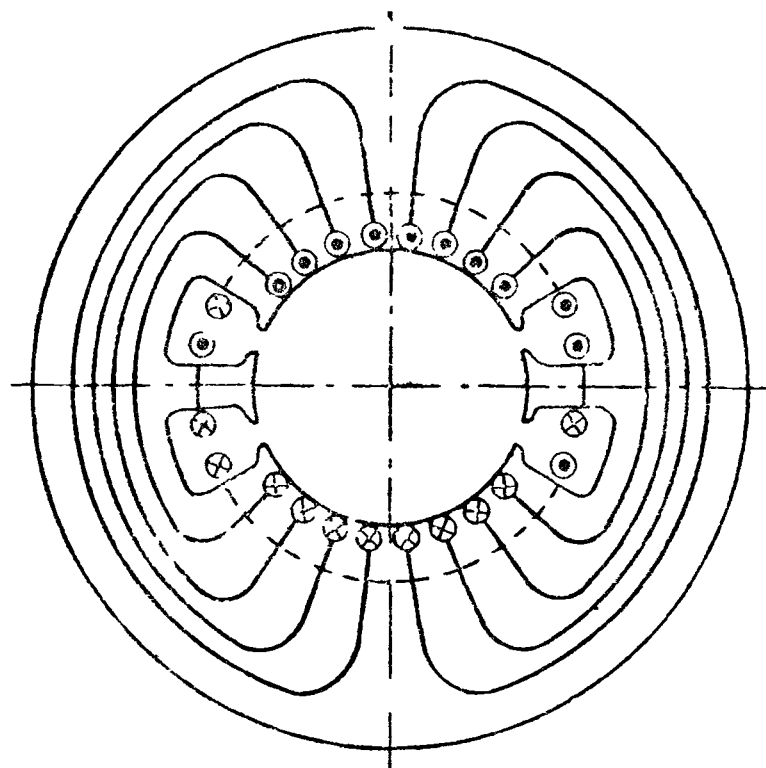
Фиг 185 Кривые полей генератора, снабженного компенсационной обмоткой и добавочными полюсами.

ционная обмотка позволяет при конструировании таких двигателей не считаться с этими перегрузками с точки зрения искажения результирующего магнитного поля, вследствие чего чрезвычайно увеличивается использование материалов.

Следует отметить, что подобные двигатели с быстро меняющейся нагрузкой иногда нуждаются еще в одном конструктивном мероприятии в чисто ком-



Фиг 186. Машина с добавочными полюсами и частью ярма, выполненными из листового железа



Фиг 187 Машина с магнитной системой, выполненной из листового железа.

мутационном отношении. Опыт показал, что при быстром изменении нагрузки поток добавочных магнитных полюсов не успевает нарастать так же быстро как ток якоря, проходящий по обмотке добавочных магнитных полюсов. Быстрое изменение тока якоря вызывает в массивных частях магнитной системы добавочных магнитных полюсов вихревые токи, которые препятствуют изменению магнитного потока добавочных полюсов. Для предупреждения этого явления делают для таких двигателей сердечники добавочных магнитных полюсов из листового железа и, кроме того, связывают последние определенным слоем листового железа, расположенным вдоль ярма (фиг. 186)

Другое решение этого вопроса состоит в устройстве всей магнитной системы машины из листового железа. В первоначальной конструкции обмотка возбуждения, так же как и компенсационная, укладывалась во впадинах,

равномерно распределенных по всей внутренней окружности ярма. Преимуществом такой конструкции является то, что в ней компенсационная обмотка полностью уничтожает магнитное поле якоря, в то время как при укладке компенсационной обмотки в пазах полюсных башмаков явно выраженных главных магнитных полюсов магнитное поле якоря уничтожается только на дуге полюсного башмака, а в промежутках между главными и добавочными магнитными полюсами получаются местные нескомпенсированные магнитные поля, которые при очень больших пиках нагрузки могут представить опасность с точки зрения появления кругового огня.

Основное магнитное поле машины при описанном устройстве магнитной системы имеет прямоугольную форму, если машина не насыщена; в насыщенной машине оно получается почти синусоидальным.

Так как при таких кривых магнитного поля нельзя получить благоприятных условий для коммутации, то перешли к укладке возбуждающей обмотки в небольшом числе пазов и к устройству специальных коммутирующих полей; равномерная укладка по всей окружности ярма была сохранена только для компенсационной обмотки. Схематическое изображение такой машины дано на фиг. 187.

В качестве недостатков такой конструкции нужно отметить ухудшение охлаждения магнитной системы, а равно большую стоимость ее по сравнению с машиной с явно выраженными магнитными полюсами. В настоящее время эта конструкция не применяется.

#### Д. ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ КРИВЫЕ КОЛЛЕКТОРА

##### 128. Потенциальная кривая коллектора при холостом ходе и синусоидальном поле

Для простоты будем рассматривать двухполюсную машину с простой спиральной обмоткой. Если поле машины синусоидально и машина не нагружена, то для нее мы можем построить многоугольник, аналогичный многоугольнику  $A \dots G$  на фиг. 132. Из рассуждений, приведенных в § 88, следует, что хорда, соединяющая любые две вершины многоугольника, дает то максимальное значение э. д. с., которое при вращении якоря получается между соответствующими точками обмотки. Таким образом, упомянутый многоугольник является частным случаем так называемых топографических, или потенциальных, диаграмм. Мы будем называть его **п о т е н ц и а л ь н ы м м н о г о у г о л ь н и к о м**.

Вершины многоугольника соответствуют точкам соединения секций обмотки друг с другом, а следовательно, и связанным с этими точками коллекторным пластинам. Если щетки стоят на геометрической нейтрали, то напряжение между ними для любого момента времени определится как проекция на ось ординат хорды, соответствующей в многоугольнике той части обмотки, которая находится между краями щеток. Вследствие этого, как мы видели (§ 88), напряжение на коллекторе претерпевает пульсацию.

При увеличении числа сторон многоугольника последний стремится к слиянию с описанным около него кругом, причем пульсации э. д. с. на коллекторе становятся столь незначительными, что ими мы можем пренебречь. Этот круг называется **п о т е н ц и а л ь н ы м к р у г о м**.

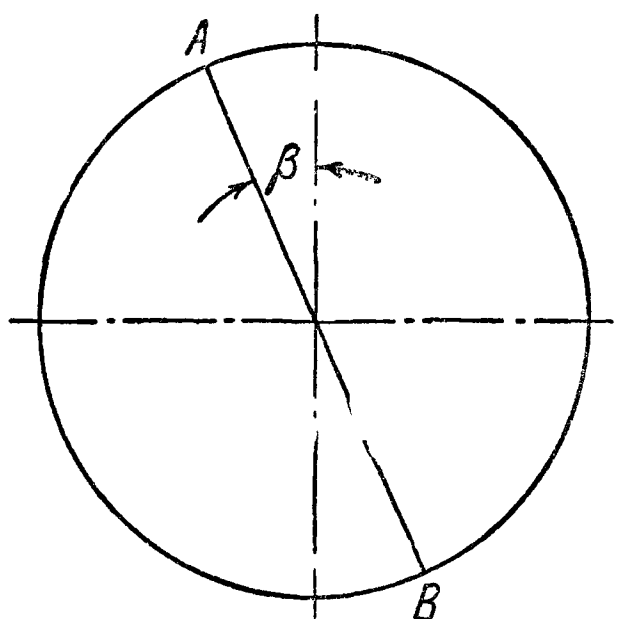
Если диаметрально расположенные на коллекторе щетки сдвинем на некоторый угол  $\beta$ , то э. д. с. между щетками уменьшится и станет равной проекции на ось ординат того диаметра потенциального круга, который составляет с осью ординат угол  $\beta$  (фиг. 188). Ради облегчения дальнейших рассуждений повернем потенциальный круг в направлении вращения часовой стрелки на угол в  $90^\circ$  и совместим его с окружностью якоря (фиг. 189). С этой же окружностью мы можем мыслить себе совмещенной и окружность коллектора. Тогда

э. д. с. между щетками для любого сдвига их с нейтрали, при сохранении диаметрального расположения их, определится как проекция на нейтраль диаметра, связывающего щетки. Так, для сдвига щеток в положение  $AB$  (фиг. 189) получим:

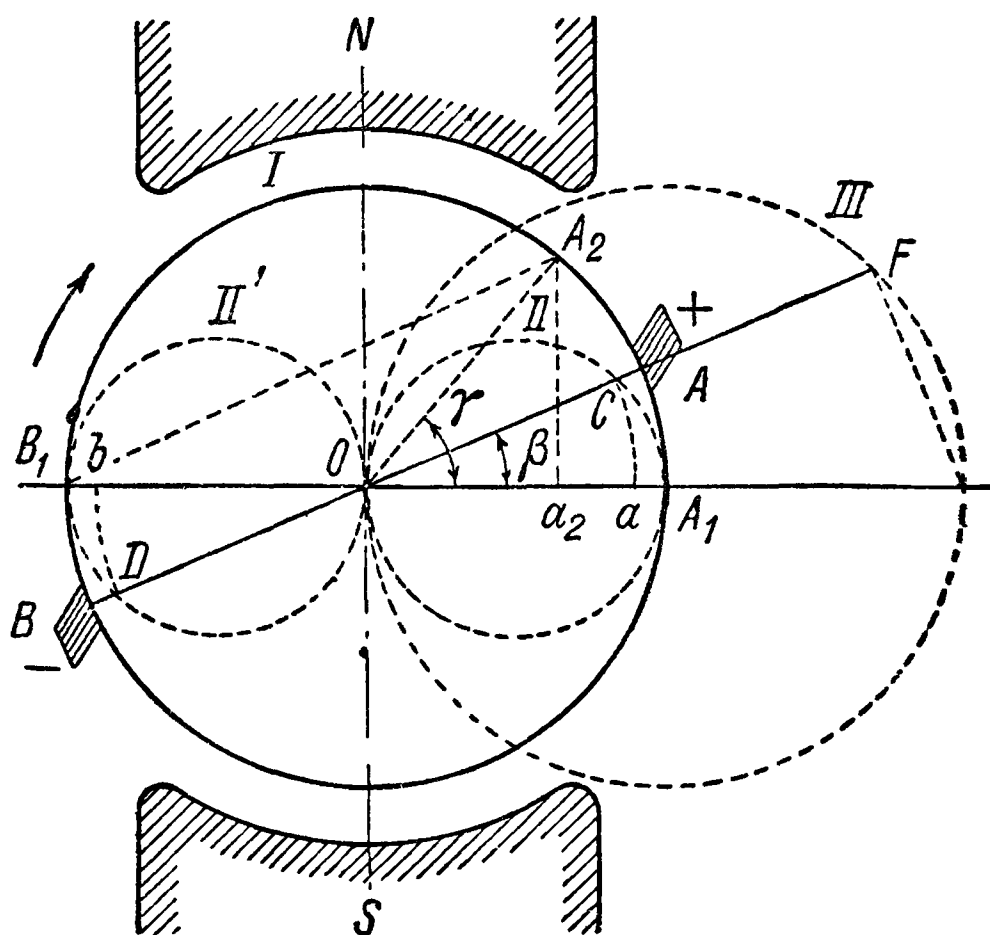
$$E_g = \overline{AB} \cos \beta = \overline{ab} = \overline{AB} \sin \left( \frac{\pi}{2} - \beta \right) = E_{g \max} \sin \left( \frac{\pi}{2} - \beta \right). \quad (264)$$

Если на радиусах  $\overline{OA_1}$  и  $\overline{OB_1}$  круга  $I$  описать круги  $II$  и  $II'$ , то нетрудно доказать, что значение э. д. с., определяемое формулой (264), равно тому срезу диаметра, соединяющего щетки в их новом положении, который заключен между точками пересечения этого диаметра с кругами  $II$  и  $II'$ :

$$E_g = \overline{AB} \cos \beta = \overline{CD}.$$



Фиг. 188 Потенциальный круг обмотки якоря



Фиг. 189 Определение напряжения на щетках при любом их положении относительно полюсов

Вместо кругов  $II$  и  $II'$  можем построить круг  $III$  с центром в точке  $A_1$  и радиусом, равным  $\overline{A_1O}$ . Из фигуры ясно, что хорда этого круга, образуемая продолжением линии, которая соединяет сдвинутые щетки, дает нам для любого  $\beta$  значение э. д. с.  $E_g$ :

$$E_g = \overline{OF}.$$

Из (264) следует, что при сдвиге щеток э. д. с. между ними будет уменьшаться синусоидально. При  $\beta = \frac{\pi}{2}$  э. д. с.  $E_g = 0$ ; при  $\beta = \pi$ , т. е. когда щетки поменяются местами, э. д. с. между ними вновь станет равной тому значению, какое имелось при  $\beta = 0$ , но полярности самих щеток теперь будут обратные. Учитывая это обстоятельство, можем написать, что

$$\text{при } \beta = 0 \quad E_g = E_{g \max},$$

$$\text{» } \beta = \frac{\pi}{2} \quad E_g = 0,$$

$$\text{» } \beta = \pi \quad E_g = -E_{g \max},$$

$$\text{» } \beta = \frac{3}{2}\pi \quad E_g = 0,$$

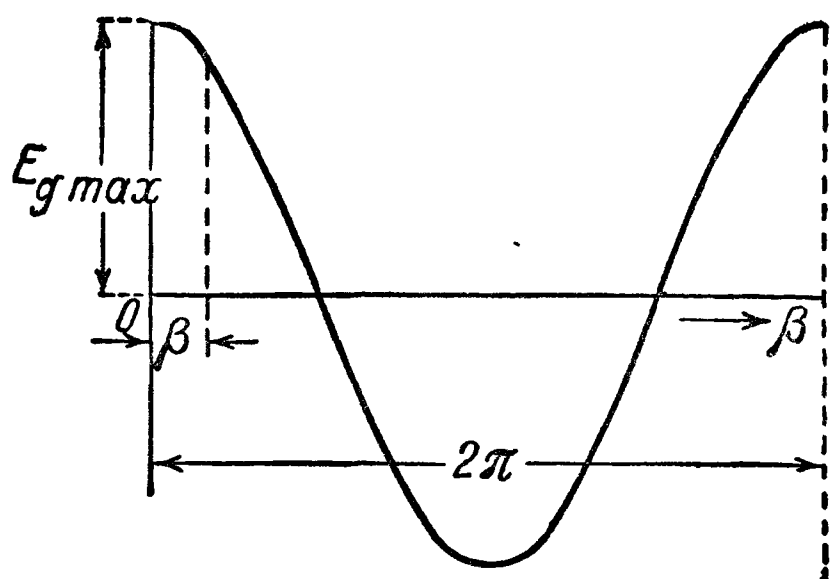
$$\text{» } \beta = 2\pi \quad E_g = E_{g \max}.$$

Начертив синусоиду с амплитудой, равной  $E_{g \max}$  (фиг. 190) и откладывая на оси абсцисс углы сдвига щеток  $\beta$ , мы для каждого из них получим соответствующее значение э. д. с. между щетками, причем для значений угла дающих положительные ординаты, щетка  $A$  будет положительной, а для значений, дающих отрицательные ординаты, щетка  $A$  будет отрицательной.

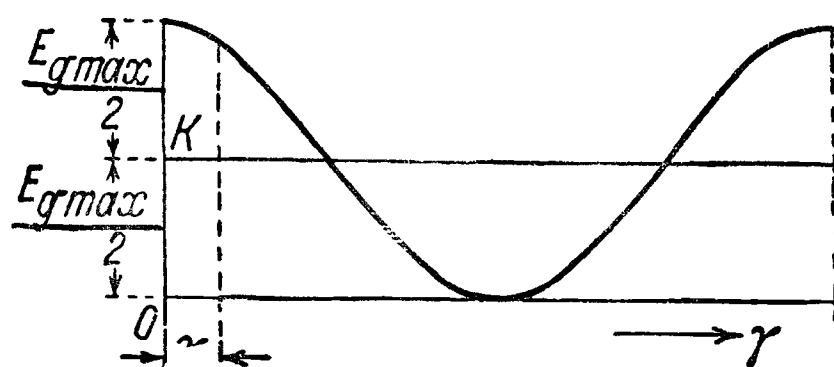


Предположим теперь, что одна из щеток, например  $B$ , стоит на геометрической нейтрали, а другая передвинута в новое положение  $A_2$  (фиг. 189). По общему вышеуказанному правилу э. д. с. между щетками определится как проекция на нейтраль хорды  $\overline{B_1 A_2}$ , т. е. отрезком  $\overline{B_1 a_2}$ . Это можно представить так:

$$E_g = \overline{B_1 O} + \overline{O a_2} = \frac{E_{g \max}}{2} + \frac{E_{g \max}}{2} \sin \left( \frac{\pi}{2} - \gamma \right), \quad (265)$$



Фиг. 190 Синусоида для определения напряжения на щетках при любом их сдвиге.



Фиг. 191 Потенциальная кривая коллектора при синусоидальном поле.

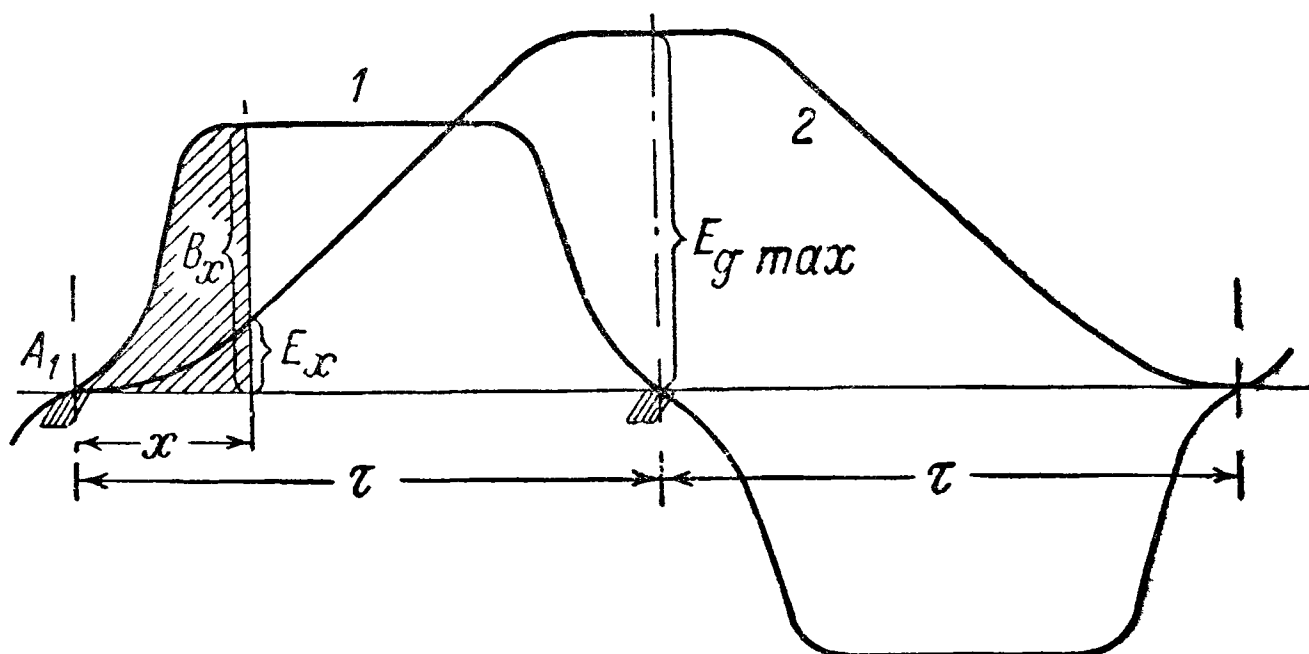
где  $\gamma$  — угол, образуемый с осью абсцисс радиусом, проведенным к новому положению сдвинутой щетки. Таким образом, э. д. с. между щетками при изменении угла  $\gamma$  будет меняться по синусоиде, ось которой сдвинута на  $+\frac{E_{g \max}}{2}$  относительно оси абсцисс (фиг. 191).

В самом общем случае, когда обе щетки сдвинуты с нейтрали на разные углы, э. д. с. между ними определится на фиг. 189 как проекция на нейтраль соединяющей их хорды, а на фиг. 191 — как разность ординат, соответствующих положению щеток на коллекторе.

Кривая на фиг. 191 носит название **потенциальной кривой коллектора**.

## 129. Потенциальная кривая коллектора при любом магнитном поле

Рассмотрим случай несинусоидального поля (фиг. 192, кривая 1). Кривая поля в соответственно пересчитанном масштабе ординат дает, как мы знаем (§ 67), изменение во времени э. д. с., индуцируемой в каждой секции якорной



Фиг. 192 Потенциальная кривая коллектора при несинусоидальном поле

обмотки. Э. д. с. между щетками, любым образом расположенными на коллекторе, представляет сумму мгновенных значений э. д. с. тех секций, которые находятся между щетками. Пусть одна щетка стоит на геометрической нейтрали,

а другая — на расстоянии  $x$  от нее. Тогда э. д. с. между ними выразится суммой ординат кривой, проведенных над каждой из секций, которые лежат в промежутке  $A_1x$ :

$$E_x = \sum_{i=0}^{i=x} 2\omega_s lv B_i = 2\omega_s lv \sum_{i=0}^{i=x} B_i \approx 2\omega_s lv \int_{x=0}^{x=x} B_i dx, \quad (266)$$

здесь  $\omega_s$  — число витков в одной секции.

При достаточно большом числе секций сумма превращается в площадь (на фиг. 192 заштрихована). Таким образом, потенциальная кривая по коллектору является интегральной кривой поля, умноженной на постоянный множитель (фиг. 192, кривая 2).

Можно доказать, что даже в случаях, когда кривая поля значительно отстает от синусоиды, потенциальная кривая при холостом ходе близка к синусоиде.

На фиг. 192 представлена потенциальная кривая коллектора при холостом ходе. При нагрузке генератора, вследствие реакции якоря, распределение поля сильно искажается, причем максимум его сдвигается в направлении вращения генератора. Так как потенциальная кривая представляет интегральную потенциальную кривую поля, то она также претерпевает при этом некоторое искажение и сдвиг в направлении вращения генератора.

### 130. Вычисление напряжения между смежными коллекторными пластинами

Э. д. с. машины постоянного тока, как мы знаем, равняется среднему значению э. д. с. одного витка, умноженному на число витков, последовательно соединенных между двумя смежными щетками.

Если секция обмотки состоит из нескольких витков  $\omega_s$ , то в данном определении слово виток можем заменить секцией и сказать, что э. д. с. машины равна среднему значению э. д. с. одной секции  $E_s$ , умноженному на число секций  $q_s$ , последовательно соединенных между двумя смежными щетками на коллекторе:

$$E_g = E_s q_s \quad (267)$$

Число коллекторных пластин между двумя смежными щетками равно.

$$\frac{K}{2p},$$

а так как в машине с простой параллельной обмоткой между соседними коллекторными пластинами имеется всего по одной секции, то для такой машины

$$q_s = \frac{K}{2p}. \quad (268)$$

Подставляя это в (267), получаем.

$$E_g = E_s \frac{K}{2p}. \quad (269)$$

Разделив обе части на  $\frac{K}{2p}$ , мы получим, очевидно, среднее значение э. д. с. между двумя смежными коллекторными пластинами, которое обозначим через  $\bar{E}_d$ :

$$E_d = \frac{E_g}{K/2p} = E_s. \quad (270)$$

Так как для простой параллельной обмотки  $\frac{p}{a} = 1$ , то (270) можем переписать так:

$$E_d = E_s \frac{p}{a}. \quad (271)$$

В машине с простой последовательной обмоткой между двумя смежными коллекторными пластинами имеем  $p$  секций; для нее поэтому

$$q_s = \frac{K}{2p} p, \quad (272)$$

$$E_g = E_s \frac{K}{2p} p, \quad (273)$$

следовательно,

$$E_d = \frac{E_g}{K/2p} = E_s p. \quad (274)$$

Так как для простой последовательной обмотки  $a = 1$ , то эту формулу можем переписать так:

$$E_d = E_s \frac{p}{a} \quad (275)$$

В машине с множественной параллельной обмоткой между коллекторными пластинами, к которым присоединена одна секция одной ветви, находится  $m - 1$  коллекторных пластин, принадлежащих прочим ветвям обмотки. Если обмотка симметрична и снабжена надлежащими уравнительными соединениями второго рода, то потенциалы всех этих пластин лежат на одной и той же потенциальной кривой коллектора; тогда можем сказать, что среднее значение напряжения между двумя смежными коллекторными пластинами будет равно  $\frac{1}{m}$  части напряжения одной секции:

$$E_d = \frac{E_g}{K/2p} = \frac{E_s}{m} = E_s \frac{p}{a}. \quad (276)$$

В машине с множественной последовательной обмоткой между двумя коллекторными пластинами, принадлежащими к одной ветви обмотки и заключающими между собой  $p$  секций, лежит  $a - 1$  пластин, принадлежащих другим ветвям. Если обмотка симметрична и снабжена уравнительными соединениями второго рода, то потенциалы всех пластин лежат на одной потенциальной кривой, а поэтому можем сказать, что среднее значение напряжения между двумя смежными коллекторными пластинами в  $a$  раз меньше среднего значения, даваемого формулой (274), которая была выведена для простой последовательной обмотки; таким образом, получим.

$$E_d = \frac{E_g}{K/2p} = E_s \frac{p}{a}. \quad (277)$$

Сравнивая формулы (271), (275), (276) и (277), видим, что все они совершенно тождественны. Таким образом, можем сказать, что для симметричных обмоток, снабженных надлежащими уравнительными соединениями, среднее значение напряжения между двумя смежными коллекторными пластинами равняется среднему значению э. д. с. одной секции за полупериод, умноженному на постоянный множитель  $\frac{p}{a}$ .

Между средними и максимальными значениями э. д. с. одной секции существует такое же соотношение, как между такими же значениями магнитной индукции в зазоре:

$$\frac{E_s}{E_{sm}} = \frac{B}{B_\delta} = \alpha_\delta. \quad (278)$$

Отсюда имеем:

$$E_{sm} = \frac{E_s}{a_\delta}$$

Очевидно, что для получения максимального значения напряжения между двумя смежными коллекторными пластинами достаточно уравнение (277) разделить на  $a_\delta$ :

$$E_{dm} = \frac{E_s}{a_\delta} \frac{p}{a} = \frac{E_g}{a_\delta K / 2p} = \frac{2pE_g}{a_\delta K}. \quad (279)$$

Мы пока что рассматривали только холостой ход. В нагруженной машине вследствие реакции якоря, максимальное значение индукции в зазоре  $B_{\delta b}$  больше, чем при холостом ходе. Для нагруженной машины отношение (278) мы должны заменить отношением:

$$\frac{B_b}{B_{\delta b}} = a_{\delta b}. \quad (280)$$

Формула (279) переписывается тогда так:

$$E_{dmb} = \frac{2pE_g}{a_{\delta b} K}. \quad (281)$$

Обозначив отношение

$$\frac{a_\delta}{a_{\delta b}} = C_b, \quad (282)$$

имеем

$$E_{dmb} = \frac{2pE_g}{a_\delta K} C_b \quad (281a)$$

Опыт показывает, что  $C_b$  лежит в пределах:

$$1 < C_b \leq 1,5,$$

в среднем надо считать  $C_b = 1,3$ . Вместе с тем опытом установлено, что если  $E_{dmb}$  превосходит определенные пределы (см. § 131), то машина начинает работать неудовлетворительно.

### 131. Предельные допустимые значения для напряжения между смежными коллекторными пластинами и явление кругового огня

Если слюдяная изоляция между коллекторными пластинами снашивается медленнее, чем коллекторные пластины, то тогда выступающий край этой изоляции начинает стачивать со щеток мелкие угольные частички, которые перекрывают изоляцию. Под воздействием напряжения, имеющегося между смежными пластинами, угольные частички раскаливаются и создают мелкие искорки в виде огненных черточек. Сами по себе эти искорки безвредны, но при известных обстоятельствах могут повлечь за собой два других явления, как то: круговой огонь и вспышку дуги между коллекторами и близко расположенными к нему металлическими частями. Искорки начинают появляться не в нейтральной зоне коммутации, а в местах, соответствующих наибольшему значению поля.

Явление кругового огня состоит в превращении упомянутых искорок в маленькие дуги, замыкающиеся от одной пластины к другой. Постепенно удлиняясь, дуги образуют сплошное огненное кольцо, охватывающее коллектор, откуда и произошло название круговой огонь. Эти дуги выплавляют и испаряют медь в местах, прилегающих к изоляции, образуя углубления.



Явление при этом сопровождается сильным треском, напоминающим подчас выстрелы.

Установлено, что возникновение дуги между смежными коллекторными пластинами, ведущее к появлению кругового огня, зависит от разности напряжений между ними. Эта разность, однако, не представляет определенной, одинаковой для всех машин величины: одна и та же разность напряжений в одном случае ведет к образованию дуги, в другом не вызывает никаких явлений.

Было найдено, что чем больше машина или чем меньше сопротивление ее секций, тем при меньшем напряжении между коллекторными пластинами могут возникнуть дуги. Это численное значение напряжения повышается с уменьшением промежутка времени, в течение которого оно проявляется. Так, пусть при напряжении между пластинами, равном 30 в, и при неискаженном поле (холостой ход) мы имеем определенную дугу. При нагрузке, вследствие реакции якоря, кривая индукции исказится и получит резко выраженный максимум, поэтому и максимальное напряжение между пластинами будет больше, чем при холостом ходе, но вследствие краткости времени, в течение которого оно проявляется, может оказаться, что это повышение максимального значения э. д. с. не повлечет за собой увеличения дуги. Иными словами, для напряжения между пластинами при нагрузке можно допустить несколько большие значения, чем при холостом ходе. Опыт это подтвердил.

Влияние продолжительности времени было исследовано еще следующим образом. Был взят быстроходный генератор напряжением в 600 в; ему сообщили скорость на 60% выше нормальной. При этой скорости коллектор был смазан графитовым составом, но дуги не возникало, хотя разность потенциалов между пластинами превосходила необходимый минимум для машины той же мощности. После этого, поддерживая то же напряжение, стали понижать скорость вращения машины, при этом все сильнее и сильнее замечалось искрообразование кругового характера; оно сохранилось и при понижении напряжения. Очевидно, при большой скорости время было слишком коротко для образования дуг. Увеличение кругового огня продолжалось до некоторого предела а затем стало падать.

Выводы опытов можно формулировать следующим образом: при толщине изоляции в 0,8 мм мощные машины редко дают круговой огонь, если максимальное напряжение между коллекторными пластинами не превосходит 28 в; для машины средней мощности пределом является 30 в, для меньших машин, например 100 *квт*, предел 33—35 в; он увеличивается до 50—60 в для маленьких машин.

Интересно сравнить результаты с обычными условиями возникновения дуги. Как известно, при переменном токе для возникновения дуги требуется 20—25 в, чему соответствует амплитуда 28—35 в.

Безвредные сами по себе искорки (огненные черточки) могут иногда повлечь за собой другое опасное для целости машины явление, а именно: возникновение дуги между коллектором и близко расположенными к нему металлическими частями. Дело в том, что искорки могут расплавлять стираемые с коллектора мельчайшие медные частички, образуя, таким образом, проводящие струи газа; последний и является причиной таких дуг, которые нормально могли бы возникнуть только при наличии напряжения, во много раз превосходящего напряжение машины. Ввиду этого можно рекомендовать в машинах высокого напряжения покрывать изолирующим лаком все металлические части, лежащие вблизи коллектора, или изолировать их каким-либо другим способом.

---

## ГЛАВА VI

### КОММУТАЦИЯ В МАШИНАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

#### А. ВВОДНЫЕ СООБРАЖЕНИЯ

##### 132. Причины, вызывающие искрение на коллекторе

Скользкий эл. контакт, образуемый неподвижными щетками и вращающимся коллектором, должен работать практически (см. § 133) без искрения при всех возможных нагрузках машины постоянного тока. Искрение, появляющееся под щетками при неблагоприятных обстоятельствах, и постепенное развитие его может повести к порче коллектора и щеток, а следовательно к нарушению нормальной работы машины.

Искрение может быть вызвано: 1) либо причинами механического происхождения (несовершенством механического выполнения коллектора и токособирательного аппарата) — **механическое искрение**; 2) либо причинами, связанными с распределением напряжения по коллектору (чрезмерные большие разности напряжений между смежными коллекторными пластинами превосходящие допустимый предел), — **потенциальное искрение**; 3) либо причинами, связанными с процессом коммутации тока в секциях якорной обмотки, — **коммутационное искрение**.

Требования, которые нужно предъявлять к механическому выполнению коллектора и токособирательного аппарата, были рассмотрены в гл. I, В. Невыполнение этих требований неизменно ведет к механическому искрению поэтому при появлении искрения на коллекторе прежде всего нужно убедиться в том, не вызвано ли оно механическими причинами, и только тогда начинать искать другие причины появления искрения.

Потенциальное искрение на коллекторе было кратко рассмотрено в гл. V (§ 131) и будет в дальнейшем рассмотрено более подробно в связи с коммутационным искрением.

Наибольшие трудности на пути развития машин постоянного тока представляло искрение, связанное с процессом коммутации тока. Под последним, как указывалось, понимается совокупность явлений, связанных с переключением секций якорной обмотки при ее вращении из одной параллельной ветви обмотки в другую в течение того короткого промежутка времени, когда оба конца секции попадают под одну и ту же щетку или под одноименные щетки и вследствие этого секция оказывается замкнутой накоротко. Процессу коммутации тока в машинах постоянного тока и посвящена данная глава.

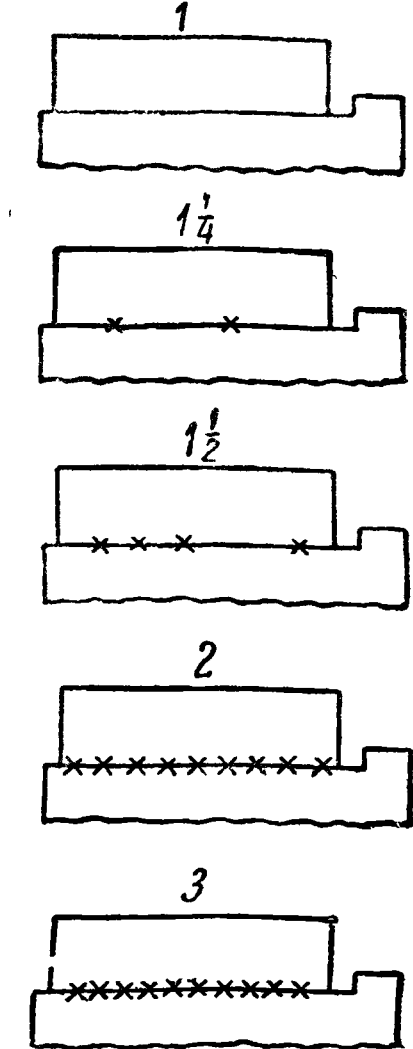
##### 133. Визуальная оценка опасности искрения на коллекторе

Не всякое искрение представляет опасность для работы машины постоянного тока. Небольшие белые искорки под щеткой, так называемые жемчужные искорки, сами по себе совершенно безвредны, и опасным является только усиление искрения и переход его в желтое искрение. Желтая окраска искр вызывается парами меди коллекторных пластин, что может привести к их выплавлению и к выгоранию щеток.

Идеальной работой щеток на коллекторе является работа при полном отсутствии искр, так называемая темная коммутация. При выпуске с электромашиностроительного завода готовой новой машины такой коммутации заводом, как правило, удается достигнуть. Однако в эксплуатации, по мере износа коллектора и щеток, появление небольшого искрения на коллекторе возможно, а потому, естественно, возник вопрос об установлении шкалы степеней искрения на коллекторе, сравнивая с которой можно было бы судить, допустимо ли возникшее искрение или нет. Такая шкала степеней искрения была выработана практикой и зафиксирована в соответствующем стандарте (ГОСТ 183-41, § 108); ниже она воспроизводится по стандарту с имеющимися в нем пояснениями. Фиг. 193 иллюстрирует табл. 16.

Степени искрения 1,  $1\frac{1}{4}$  и  $1\frac{1}{2}$  соответствуют таким условиям, когда при длительной работе коллектор и щетки остаются в состоянии, пригодном для дальнейшей работы. При таких условиях коммутация считается практически без искрения и допускается для всех номинальных режимов работы машины (§ 28).

Степень искрения 2 соответствует таким условиям работы, когда при продолжительной работе на коллекторе остаются следы почернения, а на щетках — следы нагара. Эта степень искрения допускается только при кратковременных перегрузках, толчках и реверсах (с реостатами или с пусковыми ступенями).



Фиг. 193 Степени искрения на коллекторе

Таблица 16

Степени искрения на коллекторе	
Степень 1 . . . . .	Отсутствие искрения (темная коммутация)
Степень $1\frac{1}{4}$ . . . . .	Слабое точечное искрение под небольшой частью щетки, приблизительно у четверти числа всех щеток
Степень $1\frac{1}{2}$ . . . . .	Слабое искрение приблизительно у половины числа всех щеток
Степень 2 . . . . .	Искрение под большей частью щетки у большинства или у всех щеток
Степень 3 . . . . .	Значительное искрение у всех щеток, недопустимое при длительной работе

Степень искрения 3 соответствует таким условиям работы, когда при продолжительной работе возникает почернение коллекторных пластин, а также подгар и разрушение щеток. Это соответствует опасному искрению. Эта степень искрения допускается только для моментов прямого (без реостатных ступеней) включения или реверсирования машин, если при этом коллектор и щетки остаются в состоянии, пригодном для дальнейшей работы.

134. Сложность проблемы коммутации и целесообразный порядок ее рассмотрения

Проблема коммутации представляет собой наиболее сложную и трудную из тех, с которыми пришлось встретиться на пути развития машин постоянного тока. В течение 60 лет, прошедших со времени появления первых серьезных работ по коммутации, было выполнено громадное число как теоретических, так и экспериментальных работ, посвященных коммутации в машинах постоянного тока. Если подходить к вопросу с практической точки зрения — построения безупречных в коммутационном отношении машин постоянного тока, — то после введения в практику их построения добавочных полюсов (середина первого десятилетия 900-х годов), а для особенно трудных случаев, кроме

того, компенсационных обмоток (в тех же годах), проблему коммутации можно считать разрешенной.<sup>1</sup> Если же подходить с теоретической точки зрения — создания стройной теории коммутации, позволяющей в строгой физико-математической форме охватить явления коммутации в целом и предвычислить закон изменения тока в коммутируемой секции якорной обмотки в зависимости от параметров машины, то дело обстоит иначе: такой теории пока нет, и едва ли можно рассчитывать на скорое ее появление из-за чрезвычайной сложности коммутационных явлений.

По этой причине наиболее целесообразным порядком рассмотрения коммутации нам представляется следующий, которого мы и будем придерживаться. Учитывая, что ныне подавляющее число машин постоянного тока строят с добавочными полюсами (для промышленных целей, практически, начиная с мощности в 0,5 квт), мы сначала рассмотрим коммутацию в машинах постоянного тока с добавочными полюсами с тех позиций, которые привели к их преобладающему применению в практике построения машин постоянного тока, и лишь затем рассмотрим коммутацию в машинах постоянного тока, не имеющих добавочных полюсов.

Проблема коммутации в нынешней стадии своего развития переросла в проблему скользящего электрического контакта, еще не разрешенную. Это специфическая область, которой мы сможем коснуться только в самых общих чертах.

Ради наглядности мы будем рассматривать коммутацию сначала в простейшем теоретическом случае, а затем обобщим полученные выводы на общий случай машины постоянного тока.

## Б. КОММУТАЦИЯ В ПРОСТЕЙШЕМ ТЕОРЕТИЧЕСКОМ СЛУЧАЕ

### 135 Введение

Под простейшим теоретическим случаем коммутации мы понимаем коммутацию в машине постоянного тока с добавочными полюсами, снабженной диаметральной простой параллельной обмоткой на барабанном зубчатом якоре, имеющей щетки шириной, равной или меньшей, чем ширина коллекторного деления. При этом, ради наглядности, рассмотрение начнем с гладкого кольцевого якоря с простой спиральной обмоткой и затем уже перейдем к зубчатому барабанному якору.<sup>2</sup>

### 136. Диаграмма коммутации

Диаграммой коммутации называют графическое изображение изменения тока в коммутируемой секции якорной обмотки в течение периода коммутации  $T$ , т. е. в течение времени, пока секция остается замкнутой щеткой на коротко. Ток в коммутируемой секции будем называть коммутационным током.

Рассмотрим фиг. 194, на которой представлен в развернутом в плоскость виде якорь машины постоянного тока с простой параллельной обмоткой на гладком кольцевом якоре при ширине щетки  $b_B$ , равной коллекторному делению  $\tau_k$ , все выводы сохраняют силу и при  $b_B < \tau_k$ . Обозначая через  $\beta_k$  ширину коллекторной пластины, через  $\delta_i$  — толщину изоляционной прослойки между

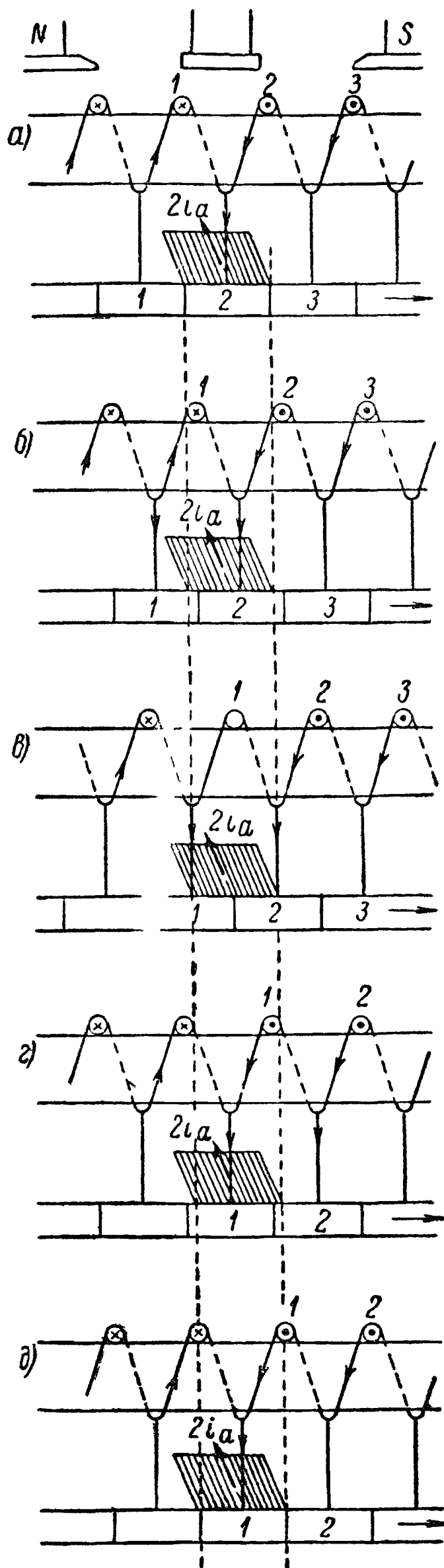
<sup>1</sup> Необходимо отметить, что, несмотря на применение дополнительных полюсов и компенсационной обмотки, коммутация все же ограничивает мощность машин постоянного тока.

<sup>2</sup> Одноэлементные ( $u_s = 1$ ) пазы применяют на практике редко, обычно  $u_s = 2 \div 4$ , ширина щетки практически берется равной не менее 1,5, а чаще всего не менее 2,5 коллекторных делений. По этой причине рассматриваемый случай назван нами простейшим теоретическим случаем.

смежными коллекторными пластинами и предполагая, что по сравнению с  $\beta_k$  можно считать  $\delta_i$  пренебрежительно малой величиной, можем написать:

$$b_B = \tau_k = \beta_k + \delta_i \approx \beta_k. \quad (283)$$

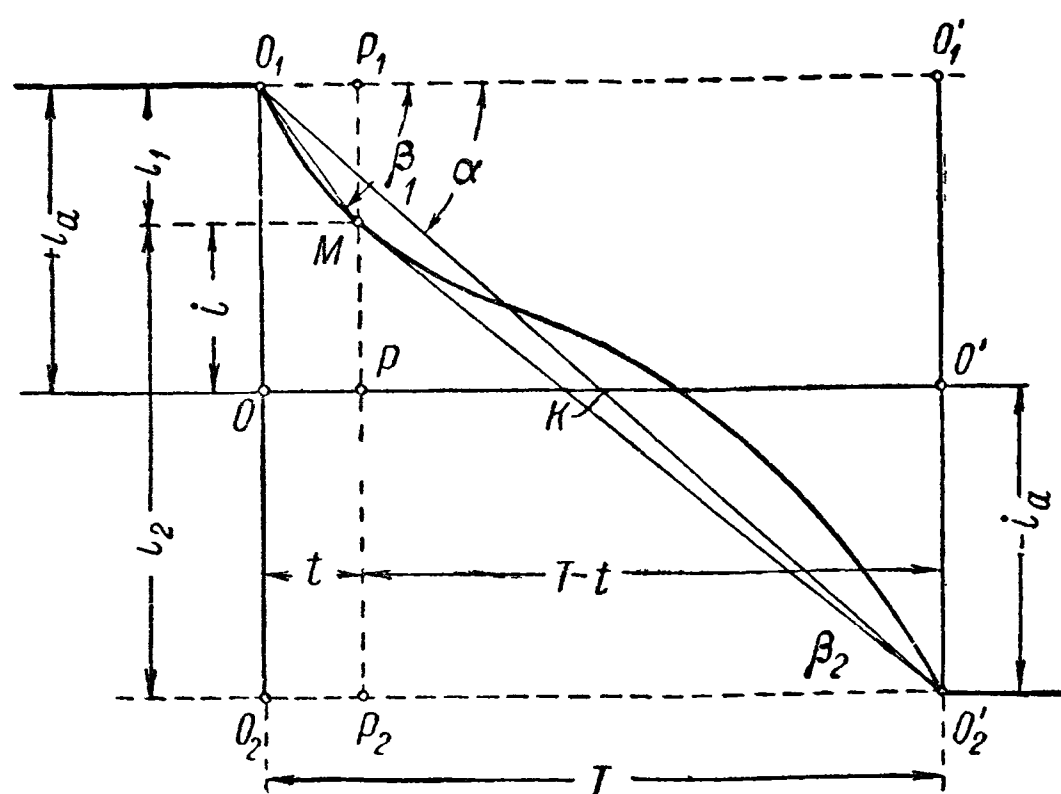
На фиг. 194 показаны для ряда моментов времени в течение периода коммутации положения вращающегося якоря относительно неподвижных щеток.



На фиг. 194, а представлено положение якоря в момент времени, когда щетка целиком покрывает коллекторную пластину № 2 и когда вследствие этого ток обеих смежных параллельных ветвей якорной обмотки отводится через эту пластину. На фиг. 194, д дан момент времени, когда якорь повернулся на угол, соответствующий одному коллекторному делению, а поэтому щетка целиком покрывает теперь коллекторную пластину № 1, и весь ток якоря идет через эту пластину. На фиг. 194, б, в, г представлены промежуточные моменты времени.

Ток в параллельной ветви якорной обмотки равен  $i_a = I_a / 2$ . Ток, отводимый одной щеткой по фиг. 194, будет, очевидно, неизменным и равным  $2i_a$ .

Принимая указанные на фигуре полярности главных полюсов, указанную на фигуре правую простую параллельную обмотку и правое вращение якоря, будем считать направление тока в ветви якорной обмотки, расположенной по левую сторону щетки, за положительное ( $+i_a$ ), тогда в ветви по правую сторону щетки оно будет отрицательным ( $-i_a$ ). В момент времени (фиг. 194, б), непосредственно следующий за началом коммутации,



Фиг. 194. Последовательные моменты коммутации секции.

Фиг. 195. Диаграмма коммутации при  $b_B = \tau_k$ .

ток в коммутируемой секции № 1 будет, очевидно, иметь то же направление, что и до начала коммутации. Вследствие этого для тока  $i_1$  в первом петушке и для тока  $i_2$  во втором петушке можем написать:

$$i_1 = i_a - i, \quad i_2 = i_a + i \quad (284)$$



В зависимости от тех условий, в которых протекает коммутация, характер изменения коммутационного тока  $i$  может быть разным. Предположим, ток  $i$  изменяется так, как показано на фиг. 195.

Нетрудно убедиться, что та же фиг. 195 дает не только  $i = f(t)$ , но и изменение во времени токов в петушках:  $i_1 = f(t)$  и  $i_2 = f(t)$ , если для тока  $i_1$  ось абсцисс  $OO'$  перенести в положение  $O_1O'_1$  и за ось ординат взять  $O_1O_2$ , а для тока  $i_2$  — ось абсцисс перенести в положение  $O_2O'_2$  и за ось ординат взять  $O_2O_1$ . В самом деле, если время, прошедшее от начала коммутации, обозначим через  $t$ ,  $\overline{OP} = t$ , то для этого момента времени, как видно из фиг. 195,

$$\overline{PM} = i; \quad \overline{MP_1} = i_a - i = i_1; \quad \overline{MP_2} = i_a + i = i_2.$$

Край щетки над коллекторной пластиной № 2 будем называть *сбегающим*, — пластина № 2 уходит из-под щетки, а край щетки над коллекторной пластиной № 1 — *набегающим*. Площадь контакта щетки  $s_2$  с пластиной № 2 и площадь контакта щетки  $s_1$  с пластиной № 1 будем называть, соответственно, площадью контакта под *сбегающим* краем щетки и площадью контакта под *набегающим* краем щетки. Нетрудно видеть, что площадь  $s_1$  пропорциональна времени коммутации  $t_1$ , а площадь  $s_2$  пропорциональна разности  $T - t$ ; поэтому обозначая через  $S_B$  площадь контакта всей щетки, можем написать:

$$\frac{s_1}{S_B} = \frac{t}{T}; \quad \frac{s_2}{S_B} = \frac{T-t}{T},$$

откуда имеем:

$$s_1 = S_B \frac{t}{T}; \quad s_2 = S_B \frac{T-t}{T}. \quad (285)$$

Для плотности тока под щеткой, когда она целиком покрывает одну пластину, можем написать:

$$j_B = \frac{2i_a}{S_B}, \quad (286)$$

а для плотностей  $j_1$  и  $j_2$  под *набегающим* и *сбегающим* краями щетки после подстановки выражений (285) имеем:

$$j_1 = \frac{i_a - i}{s_1} = \frac{i_a - i}{t} \frac{T}{S_B}; \quad j_2 = \frac{i_a + i}{T-t} \frac{T}{S_B}. \quad (287)$$

Из этого следует, что плотности  $j_1$  и  $j_2$  пропорциональны  $\frac{i_a - i}{t}$  и  $\frac{i_a + i}{T-t}$ , так как  $T/S_B = \text{const.}$  Из фиг. 195 можно написать:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \beta_1 &= \frac{\overline{MP_1}}{\overline{O_1P_1}} = \frac{i_a - i}{t}; \\ \operatorname{tg} \beta_2 &= \frac{\overline{MP_2}}{\overline{P_2O_2}} = \frac{i_a + i}{T-t}. \end{aligned} \right\} \quad (288)$$

Сопоставляя (287) и (288), имеем:

$$j_1 \equiv \operatorname{tg} \beta_1; \quad j_2 \equiv \operatorname{tg} \beta_2, \quad (289)$$

где знак  $\equiv$  обозначает пропорциональность.

Таким образом, для любого положения  $M$  на кривой тока  $i = f(t)$  мы имеем, что тангенс углов наклона к горизонтали лучей  $\overline{MO_1}$  и  $\overline{MO_2'}$  дают плотности токов под *набегающим* ( $j_1$ ) и *сбегающим* ( $j_2$ ) краями щеток. Из фиг. 195 следует, что, когда точка  $M$  совпадает с начальной  $O_1$  или с конечной  $O_2'$  точкой кривой, лучи  $\overline{MO_1}$  и  $\overline{MO_2'}$  определяют наклон к горизонтали касательной

к кривой  $i = f(t)$  в начале и, соответственно, в конце периода коммутации. Если углы, образуемые указанными касательными, будут близки к  $90^\circ$ , то, очевидно, и соответствующие плотности тока будут стремиться к бесконечности.

Таким образом, диаграмма коммутации (фиг. 195), помимо характера изменения во времени коммутационного тока  $i = f(t)$  и токов в петушках  $i_1 = f(t)$  и  $i_2 = f(t)$ , дает возможность судить об изменении во времени плотностей токов  $j_1$  и  $j_2$ , — под набегающим и сбегающим краями щетки.

Из фиг. 195 можно написать:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\overline{O_1 O_2'}}{\overline{O_1 O_1'}} = \frac{2l_a}{T}.$$

Помножив и разделив правую часть этого выражения на  $S_B$ , получим:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2l_a}{S_B} \frac{S_B}{T} \equiv \frac{2l_a}{S_B} = j_B \quad (290)$$

Отсюда следует, что наклон линии  $O_1 O_2'$  к горизонтали пропорционален плотности тока при равномерном его распределении под всей щеткой. Если бы ток  $i$  изменялся по прямой  $O_1 O_2'$ , то мы имели бы при всех его значениях:

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \operatorname{tg} \beta_2 = \operatorname{tg} \alpha,$$

а тогда из (289) и (290):

$$j_1 = j_2 = j_B, \quad (291)$$

что означает постоянную плотность тока в течение всего периода коммутации.

### 137. Уравнение коммутации в общем виде

В представленной на фиг. 194 машине постоянного тока секции, коммутируемые отдельными щетками, расположены на расстоянии полюсного деления, а поэтому не оказывают влияния друг на друга. При принятой ширине щетки  $b_B \leq \tau_k$  каждая щетка одновременно коммутирует только одну секцию; лишь по окончании периода коммутации данной секции начинается коммутация следующей секции.

Для коммутируемой секции можем написать по закону Кирхгофа, что сумма э. д. с., индуктируемых в этой секции, равна сумме падений напряжений в ней:

$$\sum e = \sum ir. \quad (292)$$

Левая часть уравнения (292) состоит: 1) из э. д. с. самоиндукции  $e_s$  от изменения во времени коммутационного тока,

$$e_s = -L_s \frac{di}{dt}, \quad (293)$$

где  $L_s$  — коэффициент самоиндукции коммутируемой секции, который мы будем считать неизменным, и 2) из э. д. с.  $e_w$  от перерезывания внешнего поля, в котором движется коммутируемая секция; в нашем случае это э. д. с.  $e_w$  от перерезывания магнитного потока добавочных полюсов. Итак, можем написать:

$$\sum e = e_s + e_w. \quad (294)$$

Поэтому (292) можем переписать так:

$$e_s + e_w = \sum ir. \quad (292a)$$

Правая часть (292) представляет собой сумму падений напряжений: 1) в сопротивлении  $R_s$  самой коммутируемой секции, 2) в сопротивлениях  $r_1$  и  $r_2$  переходных контактов щетки под ее набегающим и под сбегающим краями,

3) в сопротивлениях  $\varrho_1$  и  $\varrho_2$  петушков коллекторных пластин № 1 и № 2. Обходя контур коммутируемой секции по направлению коммутационного тока  $i$ , мы должны положить падение напряжения  $iR_s$ ,  $i_2\varrho_2$  и  $i_2r_2$  положительными, а падения напряжения  $i_1\varrho_1$  и  $i_1r_1$  — отрицательными, так как в сопротивлениях  $\varrho_1$  и  $r_2$  обход контура происходит против направления тока  $i_1$ . Таким образом, получаем:

$$\sum ir = iR_s + i_2\varrho_2 + i_2r_2 - i_1\varrho_1 - i_1r_1. \quad (295)$$

Принимая, что, естественно,  $\varrho_1 = \varrho_2 = \varrho$ , и подставляя вместо  $i_1$  и  $i_2$  их выражения из (284), имеем:

$$\begin{aligned} \sum ir &= iR_s + (i_a + i)\varrho + (i_a + i)r_2 - (i_a - i)\varrho - (i_a - i)r_1 = \\ &= iR + (i_a + i)r_2 - (i_a - i)r_1, \end{aligned} \quad (295a)$$

где

$$R = R_s + 2\varrho. \quad (296)$$

Подставляя (295a) и (296) в (292a), получаем уравнение для коммутируемой секции в общем виде:

$$e_s + e_w = iR + (i_a + i)r_2 - (i_a - i)r_1. \quad (297)$$

### 138. Прямолинейная коммутация

Предположим, что надлежащим устройством добавочных полюсов э. д. с. самоиндукций  $e_s$  компенсирована э. д. с. внешнего поля  $e_w$ ; тогда имеем:

$$e_s + e_w = 0, \quad (298)$$

и из (297) получаем:

$$iR + (i_a + i)r_2 - (i_a - i)r_1 = 0. \quad (299)$$

В это уравнение входят только сопротивления отдельных элементов контура, поэтому можем сказать, что при взаимной компенсации э. д. с.  $e_s$  и  $e_w$  получаем уравнение для коммутации сопротивлением.

Сначала упростим несколько уравнение (299), а именно, предположим, что из-за относительной малости по сравнению с прочими членами можно положить:

$$iR \approx 0, \quad (300)$$

тогда (299) получает вид:

$$(i_a + i)r_2 - (i_a - i)r_1 = 0, \quad (301)$$

откуда

$$\frac{i_a + i}{i_a - i} = \frac{r_1}{r_2}. \quad (302)$$

Предположим, что сопротивление единицы поверхности контакта щетки — величина неизменная и что сопротивления  $r_1$  и  $r_2$  изменяются обратно пропорционально поверхностям контактов  $s_1$  и  $s_2$ ; тогда можем написать:

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{s_2}{s_1}. \quad (303)$$

Подставим сюда ранее выведенные выражения для  $s_1$  и  $s_2$  (285):

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{s_2}{s_1} = \frac{S_B(T-t)}{T} : \frac{S_B t}{T},$$

получаем:

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{T-t}{t}. \quad (304)$$

Подставляя это в (302), находим.

$$\frac{l_a + l}{l_a - l} = \frac{T - t}{t}. \quad (302a)$$

Решая это уравнение относительно  $i$ , получаем:

$$i = i_a \left(1 - \frac{2t}{T}\right). \quad (305)$$

Имеем прямолинейную зависимость  $i$  от  $t$ , а потому этот случай коммутации получил название **прямолинейной коммутации**; на фиг. 195 он представлен прямой линией  $O_1O_2'$ .

Такое изменение тока отличается двумя важными особенностями. Во-первых, как мы видели, при нем плотности токов  $j_1$  под набегающим и  $j_2$  под сбегающим краями щеток остаются неизменными и равными плотности тока  $j_B$  под всей щеткой, когда она полностью касается одной коллекторной пластины.

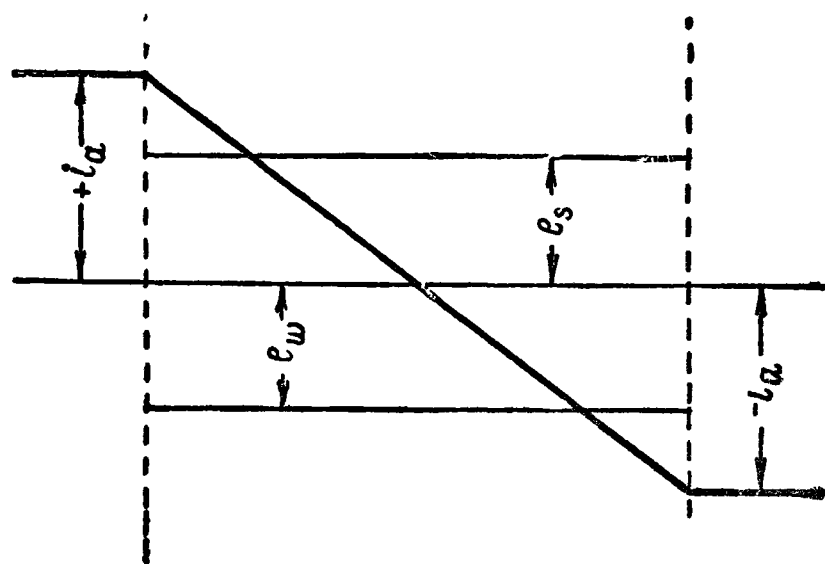
Во-вторых, из уравнения прямолинейной коммутации (305) находим:

$$\frac{di}{dt} = -\frac{2i_a}{T} = \text{const.}$$

Вследствие этого, э. д. с. самоиндукции будет в течение всего периода коммутации сохранять неизменное значение.

$$e_s = -L_s \frac{di}{dt} = L_s \frac{2i_a}{T} = \text{const.} \quad (306)$$

По этой причине и э. д. с.  $e_w$  от перерезывания потока добавочных полюсов должна быть в течение всего периода коммутации неизменной, а для этого необходимо, чтобы распределение магнитной индукции под добавочным полюсом сохранялось равномерным, это легко достигается концентрическим устройством башмаков добавочных полюсов. Соотношение  $e_s$  и  $e_w$  представлено на фиг. 196. Так как самоиндукция стремится удержать величину тока, то на фиг. 196 она должна быть отложена вверх от оси абсцисс, что и соответствует знаку перед правой частью (306); э. д. с.  $e_w$  в таком случае должна быть отложена на фиг. 196 вниз по оси абсцисс.



Фиг. 196. Прямолинейная коммутация при  $R = 0$ .

### 139. Коммутация сопротивлением

Только что рассмотренный случай коммутации представляет собой по существу коммутацию сопротивлением, однако название коммутации сопротивлением присваивают обычно случаю, когда величиной  $lR$  не пренебрегают, т. е. когда процесс коммутации выражается уравнением (299).

$$lR + (l_a + l)r_2 - (l_a - l)r_1 = 0.$$

Заменим здесь сопротивления  $r_1$  и  $r_2$  через сопротивление контакта всей щетки  $R_B$  и соответствующие поверхности контактов. Считая, как и раньше, что сопротивления  $R_B$ ,  $r_1$  и  $r_2$  обратно пропорциональны  $S_B$ ,  $s_1$  и  $s_2$ , можем написать:

$$\frac{r_1}{R_B} = \frac{S_B}{s_1}, \quad \frac{r_2}{R_B} = \frac{S_B}{s_2},$$

откуда

$$r_1 = R_B \frac{S_B}{s_1}, \quad r_2 = R_B \frac{S_B}{s_2}.$$

Заменим здесь  $s_1$  и  $s_2$  их выражениями из (285):

$$r_1 = R_B \frac{T}{t}; \quad r_2 = R_B \frac{T}{T-t}. \quad (307)$$

Подставляя это в уравнение коммутации (299), имеем

$$iR + (i_a + i) R_B \frac{T}{T-t} - (i_a - i) R_B \frac{T}{t} = 0.$$

Решая это относительно  $i$ , получаем:

$$\begin{aligned} iR(T-t)t + i_a R_B Tt + i R_B Tt - i_a R_B T^2 + i_a R_B Tt + i R_B T^2 - i R_B Tt &= 0, \\ i[R(T-t)t + R_B T^2] &= i_a R_B T(T-2t), \\ i &= \frac{i_a R_B T(T-2t)}{R(T-t)t + R_B T^2} = \frac{i_a (T-2t)}{\frac{R}{R_B} (T-t) \frac{t}{T} + T}. \end{aligned} \quad (308)$$

Для определения вида кривой  $i = f(t)$  зададимся несколькими значениями  $t$  и вычислим для них  $i$ :

$$1) \quad t = 0, \quad i = +i_a, \quad 2) \quad t = \frac{T}{4}, \quad i = \frac{+i_a}{\frac{3}{8} \frac{R}{R_B} + 2},$$

$$3) \quad t = \frac{T}{2}; \quad i = 0, \quad 4) \quad t = \frac{3}{4} T, \quad i = \frac{-i_a}{\frac{3}{8} \frac{R}{R_B} + 2};$$

$$5) \quad t = T; \quad i = -i_a.$$

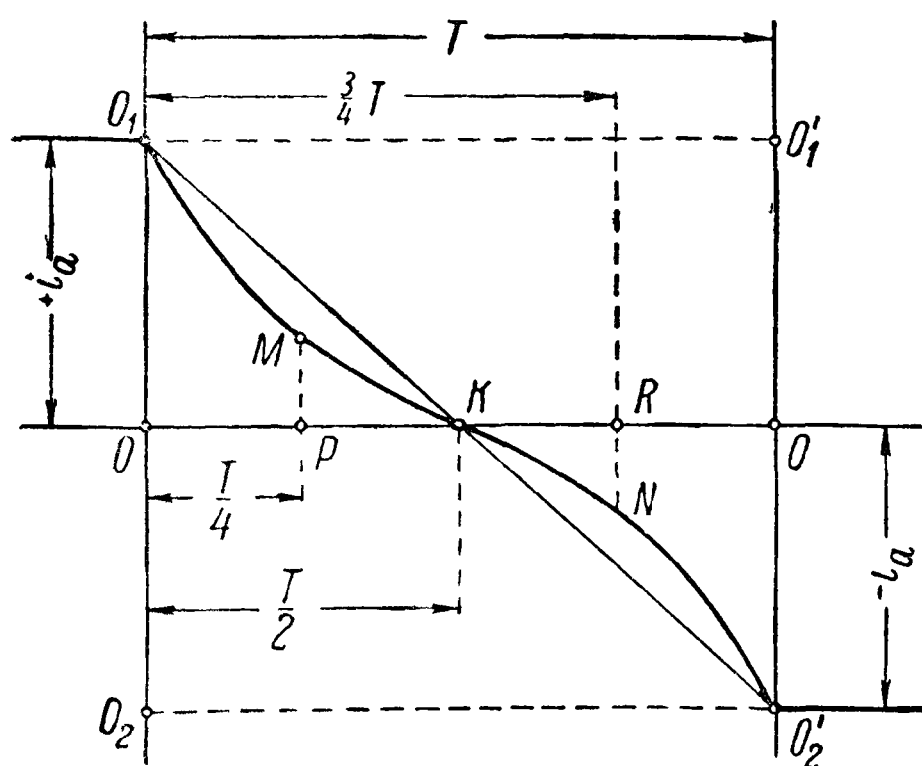
Отсюда видим, что кривая  $i = f(t)$  пройдет через начальную, среднюю и конечную точку кривой, представляющей собой прямолинейное изменение  $i$  от  $t$ , т. е. когда  $R = 0$ . При

$t = \frac{T}{4}$  и при прямолинейном изменении  $i$  от  $t$  (рис. 196) получаем  $i = \frac{i_a}{2}$ , а в случае учета  $R$  получим

$$i = \frac{+i_a}{\frac{3}{8} \frac{R}{R_B} + 2} \quad (\text{рис. 197}), \quad \text{т. е. в зна-}$$

менателе имеем величину больше 2, следовательно, теперь  $i$  будет меньше, чем при прямолинейном изменении  $i$ .

При  $t = \frac{3}{4} T$  в случае прямолинейной коммутации имеем  $i = -\frac{i_a}{2}$ , а те-



Фиг 197. Коммутация сопротивлением.

перь при учете  $R$  по абсолютному значению  $i$  будет меньше. Общий вид кривой  $i = f(t)$  при учете  $iR$  представлен на фиг. 197.

Очевидно, что отступления кривой  $i = f(t)$  от прямой при учете  $iR$  будут тем значительнее, чем больше отношение  $\frac{R}{R_B}$ . Практически это отношение

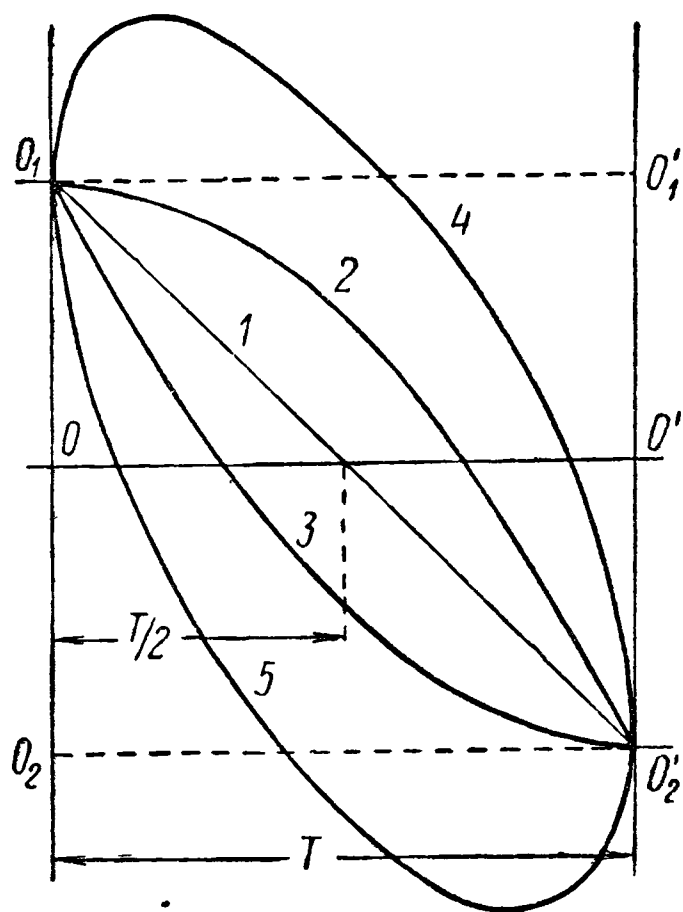
настолько мало, что указанными отступлениями можно пренебречь; однако при наличии плохо выполненных паек между обмоткой и коллектором сопротивление  $R$  может иметь значительную величину.



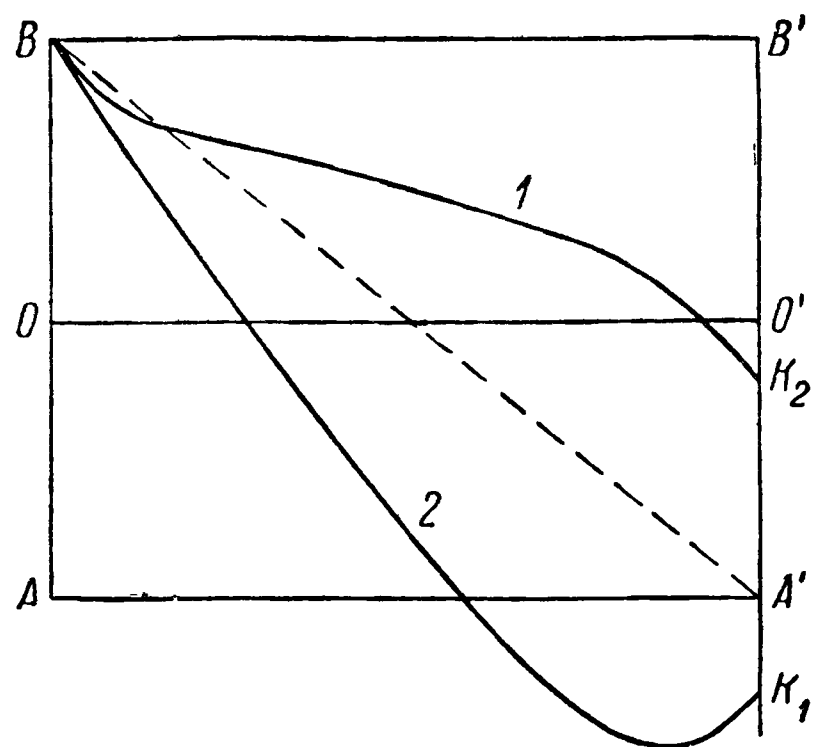
## 140. Общий случай коммутации

Все наши выводы получены в предположении, что коммутирующая э. д. с.  $e_w$  от перерезывания потока добавочных полюсов полностью компенсирует э. д. с. самоиндукции секции  $e_s$  от изменения коммутационного тока  $i$ . Спрашивается, как будет изменяться ток  $i$ , если  $e_w \neq e_s$ ?

Очевидно, что возможны два случая: во-первых, когда  $|e_w| > |e_s|$ , и, во-вторых, когда  $|e_w| < |e_s|$ . В первом случае мы имеем избыточную э. д. с. от перерезывания магнитного потока добавочных полюсов. Эта избыточная э. д. с. будет, очевидно, ускорять процесс изменения тока во времени, вследствие чего ток  $i$  достигнет нуле-



Фиг. 198. Различные случаи кривых тока в короткозамкнутой секции.



Фиг. 199. Неблагоприятные случаи коммутации.

вого значения раньше времени  $t = T/2$ , и кривая  $i = f(t)$  будет иметь вид кривой 3 на фиг. 198 — случай ускоренной коммутации.

Если  $|e_w| < |e_s|$ , то изменение тока будет происходить с замедлением во времени, и кривая тока  $i = f(t)$  достигнет нулевого значения позже момента времени  $t = T/2$  (кривая 2) — случай замедленной коммутации. При некоторых соотношениях между  $|e_w|$  и  $|e_s|$  могут получиться кривые  $i = f(t)$ , подобные кривым 4 и 5.

Как увидим дальше, некоторое ускорение коммутации сказывается на ней благополучно, и поэтому на практике, как правило, добиваются несколько ускоренной коммутации.

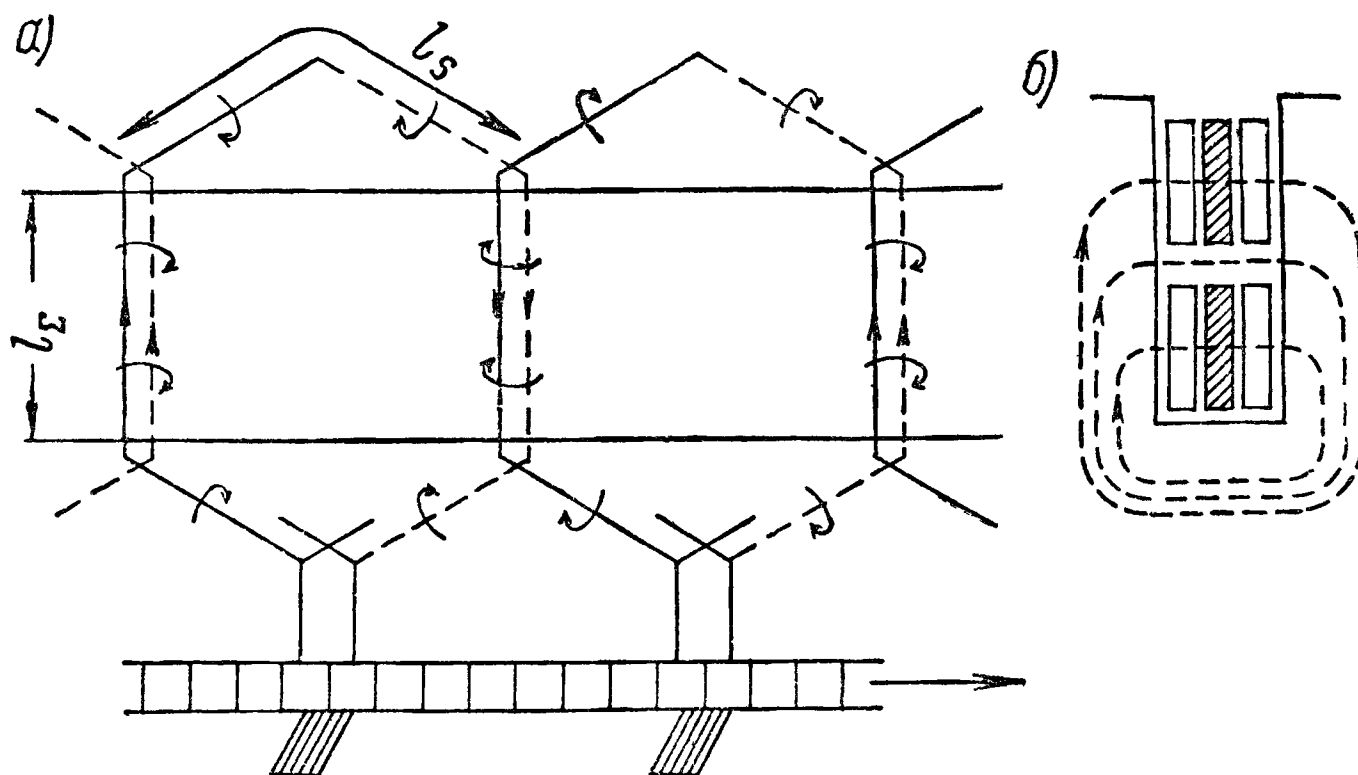
На фиг. 198 сделано предположение, что в конце периода коммутации ток  $i$  в коммутируемой секции успевает принять значение, которое он должен иметь при переходе секции в следующую параллельную ветвь обмотки якоря, т. е. что при размыкании закороченной щеткой коммутируемой секции не будет происходить разрыва тока. Если эти условия не выполнены, и в момент размыкания секции ток  $i$  будет больше или меньше нужного значения (фиг. 199, кривые 1 и 2), то освобождающаяся электромагнитная энергия может создать более или менее сильную искру под сбегающим краем щетки.

Для возникновения искры нужна определенная плотность энергии, поэтому искра появляется не при всяком разрыве тока; некоторые сорта щеток оказывают благоприятное влияние на гашение энергии, не допуская появления искры, поэтому подбор надлежащего сорта щеток играет столь важную роль в деле создания безискровой коммутации уже выполненных машин.

### 141. Реактивная э. д. с. в коммутируемой секции якорной обмотки

а) Воспользуемся определением самоиндукции катушки  $L_s$ , выраженной в генри, как суммы потокосцеплений  $\sum (w_x \Phi_x)$ , умноженной на  $10^{-8}$ , при прохождении по катушке постоянного тока в 1 а:

$$L_s = 10^{-8} \cdot \sum (w_x \Phi_x) = 10^{-8} \cdot \sum \left( \frac{0,4 \pi w_x}{R_x} \right) w_x = 0,4 \pi \cdot 10^{-8} \sum \left( \frac{w_x^2}{R_x} \right) = \\ = 0,4 \pi \cdot 10^{-8} \sum (w_x^2 \lambda_x) \text{ [гн]}. \quad (309)$$



Фиг. 200. Иллюстрация к вычислению реактивной э. д. с

Здесь  $R_x$  — магнитное сопротивление потоку самоиндукции, сцепляющемуся с  $w_x$  витками, а  $\lambda_x$  — магнитная проводимость ( $\lambda_x = 1/R_x$ ). Вычисляя сумму  $\sum (w_x^2 \lambda_x)$ , нужно учесть, что отдельные витки  $w_x$  имеют разные магнитные проводимости  $\lambda_x$ , однако мысленно эту сложную картину можно заменить другой, при которой сумма потокосцеплений будет та же  $\sum (w_x^2 \lambda_x)$ , но все витки секции  $w_s$  будут сцепляться со всеми магнитными линиями потока самоиндукции. Иными словами, можно положить, что

$$\sum (w_x^2 \lambda_x) = w_s^2 A_s, \quad (310)$$

где  $w_s$  — полное число витков секции, а  $A_s$  — проводимость условных магнитных потоков самоиндукции, дающих число сцеплений с  $w_s$  витками, равное  $\sum (w_x^2 \lambda_x)$ .

Подставив (310) в (309), имеем:

$$L_s = 0,4 \pi \cdot 10^{-8} \cdot w_s^2 A_s \text{ [гн]}. \quad (311)$$

б) Заменяем теперь кольцевую обмотку якоря, представленную на фиг. 194, диаметральной простой параллельной обмоткой, уложенной в пазах барабанного якоря (фиг. 200), сохранив попрежнему ширину щетки равной коллекторному делению

Рассматривая эту фигуру, мы можем установить, во-первых, что каждый виток якорной секции состоит из частей обмотки, утопленных в пазах якоря, — пазовых частей и из частей, лежащих вне пазовых частей, — лобовых частей; во-вторых, что у секции имеются две пазовые части, каждая длиной  $l_z$ , и две лобовые части, каждая длиной  $l_s$ .

Обозначая проводимость для потока самоиндукции на 1 см длины пазовой части через  $\lambda_n$ , а проводимость на 1 см длины лобовой части через  $\lambda_s$ , можем для  $A_s$  написать:

$$A_s = 2l_z \lambda_n + 2l_s \lambda_s = 2(l_z \lambda_n + l_s \lambda_s). \quad (312)$$

Кроме самоиндукции, мы имеем в случае фиг. 200 еще взаимную индукцию со сторонами секций, лежащими в тех же элементарных пазах, что и данная секция, и одновременно с ней коммутируемых смежными щетками. Для э. д. с. взаимной индукции можем написать:

$$e_M = -M \frac{di}{dt}. \quad (313)$$

При прямолинейной коммутации  $\frac{di}{dt}$  имеет здесь то же значение, что и для э. д. с. самоиндукции, а именно:

$$\frac{di}{dt} = -\frac{2i_a}{T},$$

поэтому для суммы э. д. с., индуцируемых в коммутируемой секции потоками самоиндукции и потоками взаимной индукции, обозначая эту сумму через  $e_R$ , можем написать:

$$e_R = e_s + e_M = L_s \frac{2i_a}{T} + M \frac{2i_a}{T} = (L_s + M) \frac{2i_a}{T} = L_R \frac{2i_a}{T}. \quad (314)$$

Здесь

$$L_R = L_s + M \quad (315)$$

есть эквивалентный коэффициент самоиндукции. Э. д. с.  $e_R$  будем называть реактивной э. д. с. коммутации.

Э. д. с. взаимной индукции возникает только в пазовых частях секции, так как лобовые части секций, выйдя из пазов, расходятся в разные стороны. Обозначая суммарную проводимость для потоков самоиндукции и для потоков взаимной индукции через  $A_R$ , а проводимость для потоков взаимной индукции на 1 см длины пазовой части секции через  $\lambda_M$ , можем написать:

$$A_R = 2[(\lambda_n + \lambda_M)l_\Sigma + \lambda_s l_s]. \quad (316)$$

Принимая в первом приближении, что

$$\lambda_M \approx \lambda_n,$$

имеем:

$$A_R = 2[2\lambda_n l_\Sigma + \lambda_s l_s]. \quad (317)$$

Вынося из скобок длину  $l_\Sigma$ , получаем:

$$A_R = 2l_\Sigma \left( 2\lambda_n + \lambda_s \frac{l_s}{l_\Sigma} \right) = 2l_\Sigma (2\lambda_n + \lambda_{sn}),$$

где

$$\lambda_{sn} = \lambda_s \frac{l_s}{l_\Sigma} \quad (318)$$

есть проводимость 1 см лобовой части, отнесенная к 1 см пазовой части секции.

Таким образом, для  $L_R$  можем написать.

$$L_R = 0,4 \pi \omega_s^2 A_R \cdot 10^{-8} = 2\omega_s^2 l_\Sigma [0,4 \pi (2\lambda_n + \lambda_{sn})] \cdot 10^{-8}. \quad (319)$$

Введем обозначение:

$$\zeta = 0,4 \pi (2\lambda_n + \lambda_{sn}) \quad (320)$$

Тогда

$$L_R = 2\omega_s^2 l_\Sigma \zeta \cdot 10^{-8} \text{ гн.} \quad (321)$$

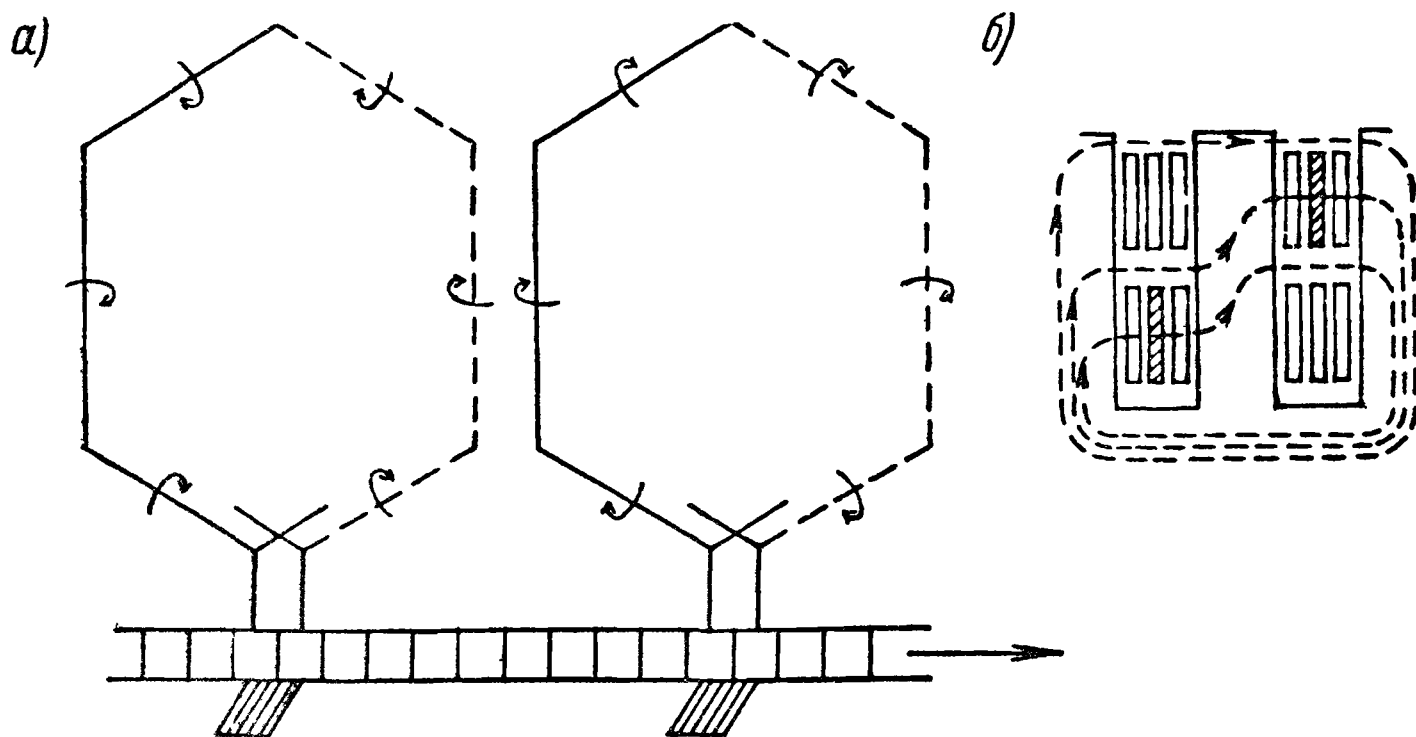
Здесь  $\zeta$  — проводимость для потоков самоиндукции и для потоков взаимной индукции, рассчитанная на 1 см длины  $l_\Sigma$  и умноженная на 0,4  $\pi$ .

в) Подставляя (321) в (293), получаем:

$$e_R = L_R \frac{2i_a}{T} = 2\omega_s^2 l_\Sigma \zeta \frac{2i_a}{T} \cdot 10^{-8}. \quad (322)$$

Это выражение можно преобразовать. Прежде всего заменим  $T$  через параметры машины. Период коммутации  $T$  рассматриваемой секции равен времени, в течение которого край коллекторной пластины (фиг. 193), вращающейся со скоростью

$$v_k = \frac{\pi D_k n}{60},$$



Фиг. 201. Влияние укорочения шага обмотки на реактивную э. д. с.

проходит расстояние, равное  $b_B = \tau_k$ , где

$$\tau_k = \frac{\pi D_k}{K},$$

т. е.

$$T = \frac{b_B}{v_k} = \frac{\pi D_k}{K} \cdot \frac{\pi D_k n}{60} = \frac{60}{Kn}. \quad (323)$$

Подставляя это в (322), заменяя один раз  $w_s$  через  $\frac{N}{2K}$ , умножая и деля все выражение на  $\pi D$  и производя преобразования, получаем:

$$e_R = 2\omega_s \frac{\pi D n}{60} \frac{N i_a}{\pi D} l_\Sigma \zeta \cdot 10^{-8},$$

или

$$e_R = 2\omega_s v_a A S l_\Sigma \zeta \cdot 10^{-8}. \quad (324)$$

Здесь  $v_a = \frac{\pi D n}{60}$  — окружная скорость якоря.

Из (324) следует, что реактивная э. д. с.  $e_R$  зависит от числа витков  $w_s$  в секции якорной обмотки, от окружной скорости якоря  $v_a$ , от линейной нагрузки  $AS$ , от длины сердечника якоря  $l_\Sigma$  и от проводимости  $\zeta$  на 1 см длины пазовой части обмотки (равной длине сердечника якоря). Формула (324) выведена для случая, когда  $b_B \leq \tau_k$ .

Формула (324) получила на практике широкое применение и для случаев, когда  $b_B > \tau_k$ , при этом разные авторы вводят в выражение для  $e_R$  те или иные уточнения в зависимости от факторов, влияющих на величину  $\zeta$ .

г) Если при ширине щетки, равной ширине коллекторного деления, обмотка якоря имеет укороченный шаг, то в одном реальном пазу имеется только одна сторона коммутируемой секции, т. е. взаимоиндукции не будет; тогда вместо фиг. 200 получим фиг. 201. Вследствие этого в скобках в выражении для  $\zeta$  (320) двойка при первом члене исчезает, и мы получим:

$$\zeta = 0,4\pi(\lambda_n + \lambda_{sn}). \quad (320a)$$

Из вышеуказанного следует преимущество, с коммутационной точки зрения, обмотки с укороченным шагом — значение величины  $\zeta$  уменьшается, что было отмечено раньше.

#### 142. Коммутирующая э. д. с., создаваемая магнитным потоком добавочных полюсов

Как мы видели (§ 138), э. д. с.  $e_w$ , индуцируемая в коммутируемой секции якорной обмотки магнитным потоком добавочных полюсов, должна быть равной по величине и обратной по направлению реактивной э. д. с (324)

Для э. д. с.  $e_w$ , используя (143), можем написать.

$$e_w = 2\omega_s v l_{w\delta} B_{w\delta} \cdot 10^{-8} \text{ в}, \quad (325)$$

где  $B_{w\delta}$  — магнитная индукция в зазоре под добавочным полюсом, а  $l_{w\delta}$  — так называемая теоретическая длина полюсного башмака добавочного полюса (см. дальше, § 156).

Приравнивая  $e_w$  реактивной э. д. с.  $e_R$  (324), получаем:

$$2\omega_s v l_{w\delta} B_{w\delta} \cdot 10^{-8} = 2\omega_s v l_\Sigma AS\zeta \cdot 10^{-8},$$

откуда

$$l_{w\delta} B_{w\delta} = l_\Sigma AS\zeta. \quad (326)$$

С изменением нагрузки будет изменяться  $AS$ , поэтому для того, чтобы э. д. с.  $e_w$  могла при всех нагрузках компенсировать э. д. с.  $e_R$ , нужно, чтобы пропорционально  $AS$  изменялось и  $B_{w\delta}$ , а этого можно достигнуть, снабжая добавочные полюсы обмотками, включенными последовательно с цепью якоря и делая магнитную цепь добавочных полюсов ненасыщенной, так как только в этом случае между магнитным потоком добавочных полюсов  $\Phi_{aw}$  (а следовательно, и индукцией  $B_{w\delta}$ ) и током нагрузки якоря  $I_a$  может сохраниться требующаяся пропорциональность.

#### 143. О коммутации в машинах постоянного тока, не имеющих добавочных полюсов

В машинах, не имеющих добавочных полюсов, для компенсации э. д. с.  $e_R$  приходится сдвигать щетки в случае генератора в направлении вращения машины таким образом, чтобы э. д. с.  $e_k$  от основного поля, уменьшенная реакцией якоря, была достаточной для компенсации э. д. с.  $e_R$ .

При том же сдвиге щеток, но при большей нагрузке, имеющееся магнитное поле будет недостаточным, а при меньших нагрузках чересчур сильным.

Таким образом, кроме случая, для которого  $e_R = e_k$ , во всех прочих будем иметь несоответствие между э. д. с. и коммутация только тогда будет



происходить благополучно, если избыточная э. д. с.  $e_R - e_k = e_f$  будет не велика и будет гаситься имеющимися щетками.

В случае двигателя сдвиг щеток должен быть таким же, но он будет теперь против направления вращения двигателя (§ 120)

### В. ПАРАМЕТРЫ КОММУТИРУЕМЫХ СЕКЦИЙ И ЗАВИСИМОСТЬ ИХ ОТ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ

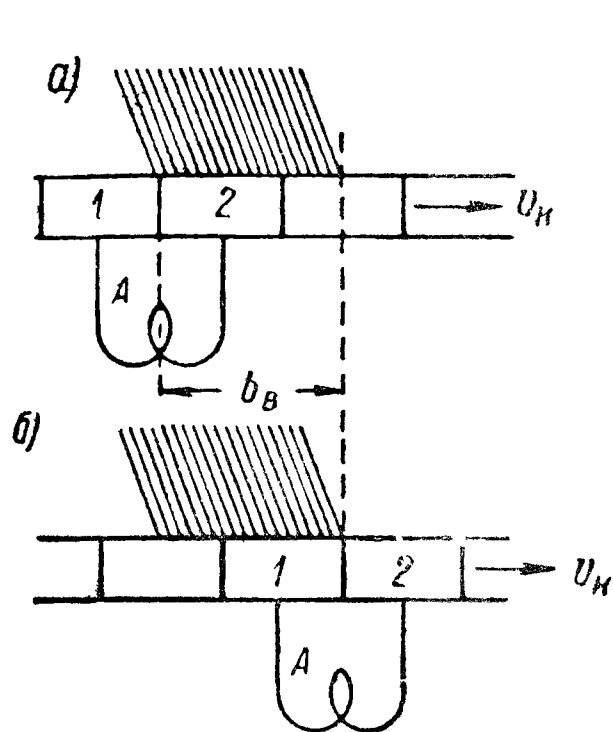
Для того чтобы решить вопрос, в какой мере полученные выше выводы для простейшего случая коммутации тока можно распространить на общий случай коммутации, рассмотрим, как будут меняться параметры коммутируемой секции в зависимости от ширины щетки и от самоиндукции секции, и сделаем затем соответствующие выводы. При этом будем предполагать, что коммутационный ток меняется по прямой линии.

#### 144. Вычисление периода коммутации для разных типов якорных обмоток

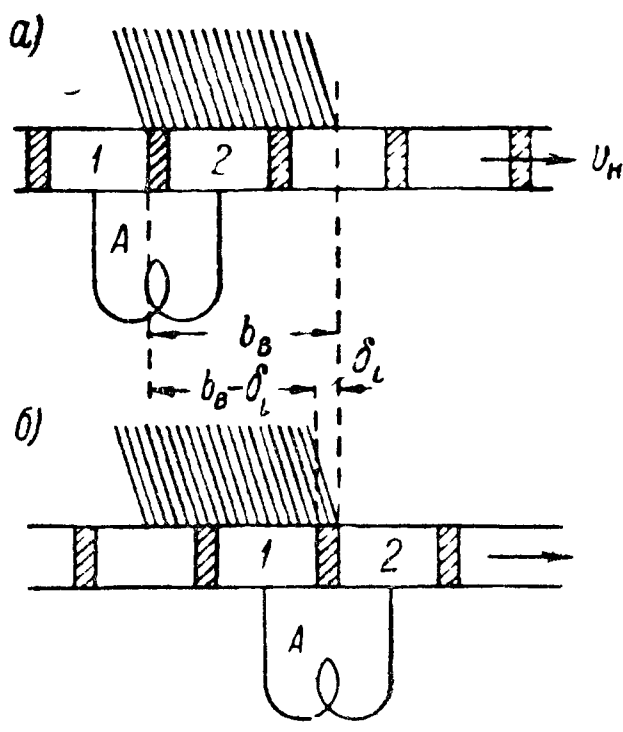
а) В частном случае, рассмотренном выше, а именно в случае машины с диаметральной барабанной простой параллельной обмоткой при ширине щетки  $b_B$ , равной коллекторному делению  $\tau_k$ , мы вывели выражение (323) для периода коммутации:

$$T = b_B / v_k,$$

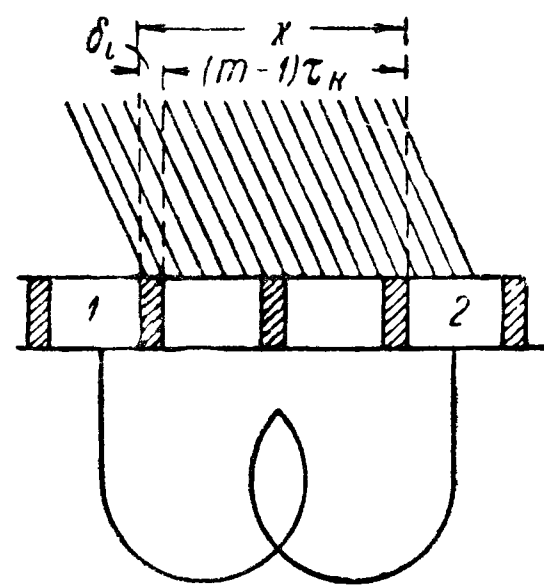
где  $b_B$  — ширина щетки,  $v_k$  — окружная скорость по коллектору, шириной коллекторной изоляционной прослойки  $\delta_i$  мы пренебрегли (фиг. 202).



Фиг. 202. Начало (а) и конец (б) коммутации при  $\delta_i \approx 0$



Фиг. 203. Начало (а) и конец (б) коммутации при  $\delta_i > 0$



Фиг. 204. Коммутация множественной параллельной обмотки при  $\delta_i > 0$ .

Учитывая ширину  $\delta_i$ , нужно фиг. 202 заменить фиг. 203. Из последнего вытекает, что для простой параллельной обмотки и для  $b_B \leq \tau_k$  период коммутации будет:

$$T = \frac{b_B - \delta_i}{v_k}. \quad (327)$$

Нетрудно видеть из фиг. 203, что выражение для  $T$  будет справедливым для простой параллельной обмотки и для  $b_B > \tau_k$

б) Возьмем теперь множественную параллельную обмотку с коэффициентом множественности  $m = 3$  (фиг. 204). Этот случай будет отличаться от только что рассмотренного (фиг. 203) тем, что две пластины, к которым присоединена данная секция якорной обмотки,

будут теперь отделены друг от друга не только изоляцией  $\delta_i$ , как это имеет место на фиг. 203, но еще и числом коллекторных делений  $\tau_k$ , равным  $m - 1$ ; поэтому для  $T$  (фиг. 204) получим:

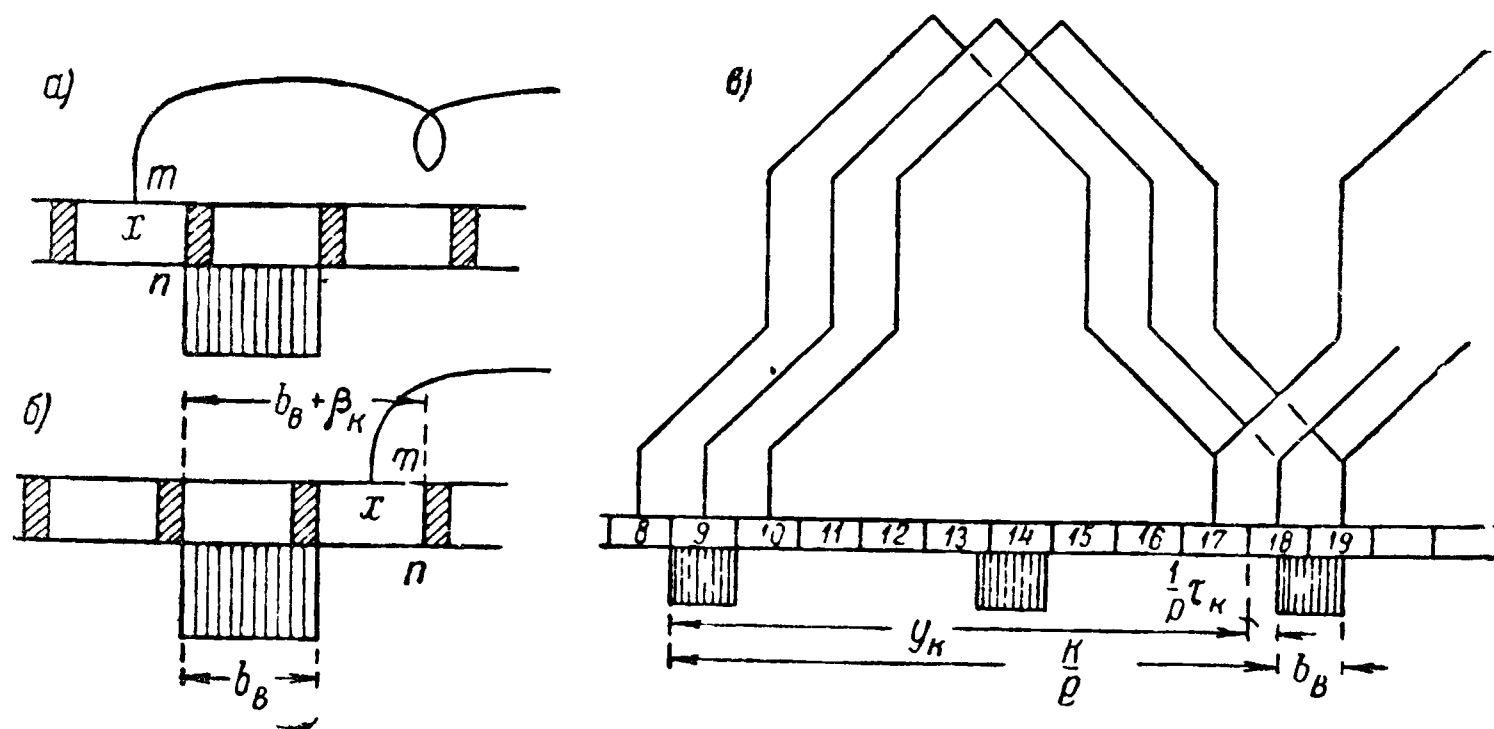
$$T = \frac{b_B - x}{v_k}, \quad (328)$$

где

$$x = \delta_i + (m - 1) \tau_k. \quad (329)$$

Подставляя это в (327), находим:

$$T = \frac{b_B - (m - 1) \tau_k - \delta_i}{v_k}. \quad (330)$$



Фиг. 205. Начало (а) и конец (б) коммутации последовательной обмотки при  $\delta_i > 0$ .

Заменяя  $m$  равным ему значением  $a/p$ , получаем:

$$T = \frac{b_B - \left(\frac{a}{p} - 1\right) \tau_k - \delta_i}{v_k} = \frac{b_B + \left(1 - \frac{a}{p}\right) \tau_k - \delta_i}{v_k}. \quad (331)$$

Это выражение годится, очевидно, и для простой параллельной обмотки, для которой  $\frac{a}{p} = 1$ , вследствие чего в числителе второй член обращается в нуль, и она переходит в (327).

в) В машине с простой последовательной обмоткой при установке на коллекторе только двух щеток, по одной каждой полярности, каждая щетка замыкает  $p$  последовательно соединенных секций обмотки. При установке полного числа  $2p$  щеток каждая из  $p$  секций оказывается замкнутой накоротко, кроме того, независимо другими одноименными щетками.

При правильной расстановке щеток на коллекторе расстояние по коллектору между набегаящими краями щеток равно  $K/p$  коллекторных делений (фиг. 205, в), расстояние же между правыми краями коллекторных пластин, с которыми соединена коммутируемая секция якорной обмотки, выраженное числом коллекторных делений, равно шагу обмотки по коллектору (175):

$$y_k = \frac{K \pm 1}{p} = \frac{K}{p} \pm \frac{1}{p},$$

т. е. больше или меньше расстояния между щетками на  $\frac{1}{p}$  часть коллекторного деления (это представляет собой сдвиг в магнитном поле). Если бы расстояние между коллекторными пластинами коммутируемой секции равнялось  $K/p$  коллекторных делений, то одноименные щетки одновременно начинали

набегать на эти коллекторные пластины (фиг. 205, а, пластины  $x$  и  $x + y_k$ ) — начало процесса коммутации, и одновременно сбегали бы с этих пластин — конец процесса коммутации (фиг. 205, б). Продолжительность процесса коммутации тогда выражалась бы временем, которое требуется для продвижения набегающего края коллекторной пластины (на фиг. 205, а, б набегающий край щетки помечен через  $mn$ ) на расстояние  $b_B + \beta_k$  и, следовательно, для периода коммутации мы имели бы формулу:

$$T = \frac{b_B + \beta_k}{v_k} = \frac{b_B + \tau_k - \delta_i}{v_k}.$$

В действительности же, вследствие того что  $y_k \geq \frac{K}{p}$  на  $\frac{1}{p}$  коллекторного деления, период коммутации сократится на время

$$t' = \frac{\tau_k \frac{1}{p}}{v_k},$$

как это следует из фиг. 205. Таким образом, для простой последовательной обмотки с полным числом щеток  $2p$  окончательно имеем:

$$T = \frac{b_B + \tau_k - \delta_i}{v_k} - t' = \frac{b_B + \tau_k \left(1 - \frac{1}{p}\right) - \delta_i}{v_k}. \quad (332)$$

г) Для множественной последовательной обмотки и при полном числе щеток  $2p$  на коллекторе все наши рассуждения останутся в силе, но уменьшение периода коммутации будет в  $a$  раз значительнее, так как разность между двухполюсным делением по коллектору  $K/p$  и шагом  $y_k$  теперь равна  $a/p$ . Итак, можем написать.

$$T = \frac{b_B + \left(1 - \frac{a}{p}\right) \tau_k - \delta_i}{v_k}. \quad (333)$$

Эта формула годна и для простой параллельной обмотки, имеющей всегда полное число коллекторных щеток, так как при  $a = p$  второй член в числителе равен нулю и формула (333) переходит в (327).

Сравнивая формулу (333) с (327), можем сказать, что выражение для периода коммутации при установке на коллекторе полного возможного числа щеток можно представить в одинаковом виде как для параллельных (простой и множественной), так и для последовательных (простой и множественной) обмоток (333).

$$T = \frac{b_B + \left(1 - \frac{a}{p}\right) \tau_k - \delta_i}{v_k}.$$

Однако при одинаковом выражении для  $T$  (333) мы получаем, что, в случае множественной параллельной обмотки, период коммутации будет короче, чем для простой параллельной обмотки, так как для первой  $m = a/p > 1$ , а следовательно, второй член в числителе формулы (333) будет отрицательным. Наоборот, для применяемых на практике простых последовательных обмоток ( $a = 1$ ) и множественных последовательных обмоток ( $a < p$ ), период коммутации  $T$  будет больше, чем у простой параллельной обмотки, так как для них  $\frac{a}{p} < 1$ .

д) Выясним вопрос: как изменится длительность периода коммутации последовательной обмотки, если мы уменьшим число щеток, выкинув по  $p_w$

щеток каждой полярности. Тогда расстояние между оставшимися смежными одноименными щетками, измеренное числом коллекторных делений  $\tau_k$ , будет не  $K/p$ , как при полном числе  $2p$  щеток, а

$$\frac{K}{p} (1 + p_w).$$

Расстояние между набегающими краями коллекторных пластин коммутируемых секций, попадающих под смежные одноименные щетки, будет меньше расстояния между упомянутыми щетками на

$$\frac{a}{p} (1 + p_w)$$

коллекторных делений. При этом в коммутацию будет попадать цепь из  $(1 + p_w)$  последовательно соединенных секций. Период коммутации, таким образом, напишется так.

$$T = \frac{b_B + \tau_k - (1 + p_w) \frac{a}{p} \tau_k - \delta_i}{v_k} = \frac{b_B + \left[ 1 - (p_w + 1) \frac{a}{p} \right] \tau_k - \delta_i}{v_k}. \quad (334)$$

Очевидно, что выражение для  $T$  (334) может быть принято как общее, независимо от рода обмотки. В самом деле, в случае параллельных обмоток, имеющих всегда полное число щеток  $2p$ , имеем  $p_w = 0$  и (334) переходит в ранее найденное для них выражение для  $T$  (333).

е) Если у машины с последовательной обмоткой, простой или множественной, оставить всего по одной щетке каждой полярности, то тогда

$$p_w = p - 1,$$

и выражение (334) принимает такой вид.

$$T = \frac{b_B + (1 - a) \tau_k - \delta_i}{v_k}, \quad (335)$$

что для простой последовательной обмотки ( $a = 1$ ) принимает вид:

$$T = \frac{b_B - \delta_i}{v_k}, \quad (336)$$

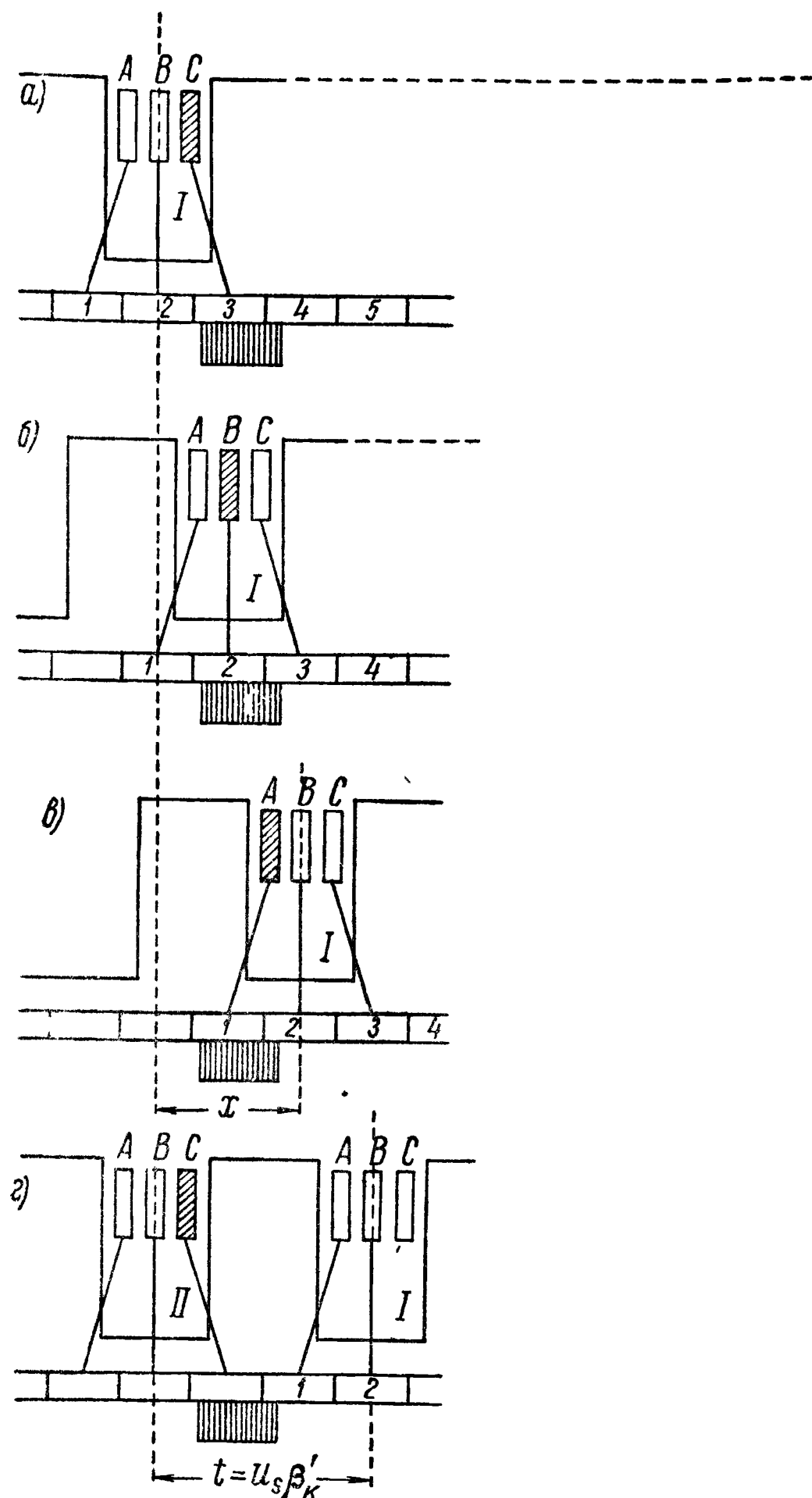
т. е. если у простой последовательной обмотки поставить на коллекторе только две щетки, период коммутации для нее будет таким же, как и у простой параллельной обмотки (327).

Из этого вытекает, что возможное у последовательной обмотки уменьшение числа щеток на коллекторе влечет за собой не только увеличение числа последовательно соединенных секций, попадающих одновременно в коммутацию, но и уменьшение периода коммутации. Таким образом, получаем еще одно указание в пользу установки в машинах с последовательными обмотками полного числа щеток.

Уменьшение числа щеток до двух применяется поэтому только у четырех-полюсных тяговых двигателей с последовательными обмотками и делается для облегчения их ревизии (осмотр через люки сверху).

ж) Если одноименные щетки последовательной обмотки окажутся отстоящими друг от друга не на одинаковом расстоянии, то период коммутации у одних коммутируемых секций окажется удлиненным, у других — укороченным. Это поведет неизбежно к расстройству коммутации, а поэтому надлежащая точная установка щеток на коллекторе, а также возможно строгое выполнение коллектора (равенство коллекторных делений) имеют очень большое значение для успешной работы машины.

Если при правильной расстановке щеток произвести затем сдвиг всех щеток одной полярности на некоторое расстояние относительно всех щеток другой полярности, то это не скажется на периоде коммутации секций, но будет влиять (как увидим ниже) на период коммутации всего объема тока одной впадины.



Фиг. 206 Влияние на коммутацию секции якорной обмотки зубчатости якоря.

и ширину коллекторного деления к диаметру якоря, для чего нужно умножить их на отношение диаметров якоря  $D_a$  и коллектора  $D_k$ :

#### 145. Влияние на коммутацию секции якорной обмотки зубчатости якоря

Коллекторные пластины распределены по окружности коллектора равномерно, а секции якорной обмотки зубчатого барабанного якоря сгруппированы в пазах и  $u_s$  в каждом; вследствие этого магнитные условия для отдельных  $u_s$  секций паза будут неодинаковыми как это вытекает из следующего рассмотрения

На фиг. 206 представлен в развернутом в плоскость виде якорь и коллектор для четырех моментов времени, из которых каждый соответствует повороту якоря с коллектором на угол, равный ширине коллекторной пластины. Так как щетки неподвижны, то каждое положение (фиг. 206, а, б, в, г) соответствует определенному моменту времени коммутации очередной секции якорной обмотки.<sup>1</sup>

Обозначая, как и раньше, внешние диаметры коллектора и якоря через  $D_k$  и  $D_a$ , имеем практически:

$$D_k = (0,6 \div 0,9) D_a. \quad (337)$$

При вычерчивании на фиг. 206 коллектора совместно с якорем в развернутом в плоскость виде, нужно привести ширину коллекторной пластины, ширину щетки

$$\beta_k' = \beta_k \frac{D_a}{D_k}; \quad \tau_k' = \tau_k \frac{D_a}{D_k}; \quad b_{B'} = b_B \frac{D_a}{D_k}. \quad (338)$$

<sup>1</sup> На фигуре показано присоединение к коллекторной пластине только начала каждой секции. Так, пластина 1 соединена с началом секции А впадины, обозначенной I. Конец этой секции присоединяется к смежной пластине 2. Предполагаем простую параллельную обмотку.



Точно так же окружная скорость по коллектору  $v_k$  должна быть приведена к окружной скорости по якорю.

$$v_k' = v_k \frac{D_a}{D_k} = v_a. \quad (339)$$

Магнитные условия для  $u_s$  секций, лежащих в одном пазу (в нашем случае  $u_s = 3$ ), можно считать одинаковыми. Сравнивая фиг. 206, в и 206, а, видим, что в момент окончания коммутации секции А (фиг. 206, в) середина паза I лежит ближе к полюсному башмаку, чем в случае коммутации секции С (фиг. 197, а) на расстояние  $x$ . Вследствие этого, если магнитные условия для коммутирования секции С (фиг. 206, а) оказываются удовлетворительными, то для секции В (фиг. 206, б) и, в особенности, для секции А (фиг. 206, в) коммутирующее поле может оказаться чересчур большим или чересчур малым. Тогда при коммутировании секции А могут появиться искры, которые будут чернить, а следовательно, и портить соответствующие пластины коллектора. Расстояние  $x$ , как видим из фиг. 206, определяется следующим образом:

$$x = t_1 - \beta_B' \approx t_1 - \tau_k'. \quad (340)$$

Опыт показал, что в больших машинах, во избежание указанных нежелательных явлений, нужно брать столько пазов на полюс, чтобы между полюсными башмаками укладывалось не менее 3,5 шага зубцов. Иными словами, для больших машин должно выполняться условие:

$$(1 - \alpha_\delta) \tau_a > 3,5 t_1$$

или

$$\tau_a > \frac{3,5 t_1}{1 - \alpha_\delta}. \quad (341)$$

При  $\alpha_\delta = 0,675$  (среднее значение для машин с добавочными полюсами) получаем:

$$\tau_a > \frac{3,5 t_1}{0,325} \approx 11 t_1. \quad (342)$$

На практике для больших машин берут не менее 12 пазов на полюс. Вообще, в зависимости от мощности машины, можно руководствоваться данными табл. 17.

Таблица 17

Мощность машины	Минимальное число пазов на полюс
5 кВт и меньше	7—8
5—50 кВт	9—12
50 кВт и больше	12 и больше

#### 146. Период коммутации секций одного реального паза и необходимая ширина коммутационной зоны

а) Периодом коммутации секций реального паза называется время от начала коммутации первого элементного паза до конца коммутации последнего элементного паза данного реального паза. В случае диаметральной якорной обмотки верхняя и нижняя индуктируемые стороны одного и того же элементного паза коммутируются одновременно, поэтому для диаметральной обмотки период коммутации паза определяется временем, необходимым для коммутации верхнего слоя впадины.

Как мы только что видели (§ 145), последняя из  $u_s$  секций верхнего слоя данной реальной впадины оказывается придвинутой к полюсному башмаку

в начальный момент коммутации на расстояние  $x = t_1 - \beta_k' \approx t_1 - \tau_k$  ближе, чем первая. Так как (фиг. 206)

$$t_1 = u_s \tau_k',$$

то

$$x \approx u_s \tau_k' - \tau_k' = \tau_k' (u_s - 1).$$

Прохождению секцией этого расстояния соответствует время:

$$T_1 = \frac{\tau_k' (u_s - 1)}{v_k'} = \frac{\tau_k' (u_s - 1)}{v_a}. \quad (343)$$

Период коммутации  $T_k$  паза будет, очевидно, больше периода коммутации секции  $T$  на время  $T_1$ .

$$T_k = T + T_1. \quad (344)$$

Умножив числитель и знаменатель выражения для  $T$  на отношение  $D_a/D_k$ , получим:

$$T = \frac{b_B + \left(1 - \frac{a}{p}\right) \tau_k}{v_k} = \frac{b_{B'} + \left(1 - \frac{a}{p}\right) \tau_k'}{v_a}, \quad (345)$$

где  $v_a$  — окружная скорость якоря, и

$$b_{B'} = b_B \frac{D_a}{D_k}, \quad \tau_k' = \tau_k \frac{D_a}{D_k}.$$

Таким образом, после подстановки (345) и (343) в (344) имеем.

$$T_k = T + T_1 = \frac{b_{B'} + \left(1 - \frac{a}{p}\right) \tau_k'}{v_a} + \frac{\tau_k' (u_s - 1)}{v_a} = \frac{b_{B'} + \left(u_s - \frac{a}{p}\right) \tau_k'}{v_a}. \quad (346)$$

Мы предполагали, что обмотка диаметральная. В случае хордовой обмотки процесс коммутации верхних и нижних сторон одного реального паза будет происходить неодновременно. Как мы видели, хордовая обмотка получается как при  $\frac{Z}{2p}$ , равном целому числу, так и при  $\frac{Z}{2p}$ , равном дробному числу; в первом случае сокращение секционного шага обмотки должно быть целым числом, во втором — дробным. Если  $\frac{Z}{2p} \neq \text{ц. ч.}$ , то, в случае симметричной простой параллельной обмотки,  $\frac{Z}{p} = \text{ц. ч.}$ , следовательно,  $\frac{Z}{2p} = \text{ц. ч.} + \frac{1}{2}$ . Так как первый частичный секционный шаг (221):

$$y_{s1} = \frac{Z}{2p} u_s - \varepsilon_s$$

должен быть целым числом, то  $\varepsilon_s$  будет равно целому числу  $+\frac{1}{2}$ . В случае равносекционной хордовой обмотки при  $\frac{Z}{2p} = \text{ц. ч.}$   $\varepsilon_s$  должно быть кратным  $u_s$ , а следовательно, и кратным  $\frac{u_s}{2}$ . При  $\frac{Z}{2p} \neq \text{ц. ч.}$ , но при  $\frac{Z}{p} = \text{ц. ч.}$ , укороченное  $\varepsilon_s$  будет, очевидно, кратно  $\frac{u_s}{2}$ , а потому вообще можно написать, что

$$\varepsilon_s = n_s \frac{u_s}{2}, \quad (347)$$

где  $n_s$  принимает целые четные значения при  $\frac{Z}{2p} = \text{ц. ч.}$  и принимает не-

четные значения при  $\frac{Z}{2p} \neq \text{ц. ч.}$  Таким образом,  $\varepsilon_s$  представляет укорочение первого секционного шага против диаметрального шага, измеренное числом элементарных пазов. Так как число элементарных пазов на реальный паз равно числу коллекторных пластин на реальный паз, то  $\varepsilon_s$  представляет также укорочение шага, измеренное числом коллекторных делений. Для удобства изложения заменим  $\varepsilon_s$  на  $\varepsilon_k$  и перепишем формулу (221) так:

$$y_{k1} = \frac{K}{2p} - \varepsilon_k. \quad (348)$$

Здесь  $y_{k1}$  — первый частичный шаг в коллекторных делениях, а  $\frac{K}{2p}$  — полюсное деление по коллектору. Соответственно этому выражение (347) перепишется так:

$$\varepsilon_k = n_k \frac{u_s}{2}; \quad (349)$$

здесь  $n_k$  численно равно  $n_s$ .

Если первый частичный шаг укорочен против полюсного деления на  $\varepsilon_k$  коллекторных делений, то процесс коммутации нижних сторон в пазу начинается на время, соответствующее повороту якоря на  $\varepsilon_k \tau'_k$  пластин раньше или позже, чем процесс коммутации верхних сторон того же реального паза. Вследствие этого период коммутации паза  $T_N$  должен удлиниться на время

$$T_2 = \frac{\varepsilon_k \tau'_k}{v_a}.$$

Таким образом, используя это, получим:

$$T = T + T_1 + T_2 = \frac{b'_B + \left(u_s - \frac{a}{p}\right) \tau'_k + \varepsilon_k \tau'_k}{v_a},$$

или

$$T_k = \frac{b'_B + \left(\varepsilon_k + u_s - \frac{a}{p}\right) \tau'_k}{v_a}. \quad (350)$$

Это является общим выражением для периода коммутации  $T_N$  паза.

б) Выражение, стоящее в (350) в числителе, представляет ширину коммутационной зоны одного паза, т. е. дугу окружности якоря, на которой происходит коммутирование данной щеткой секций якорной обмотки, лежащих в одном пазу. Обозначим ширину коммутационной зоны через  $b_R$ :

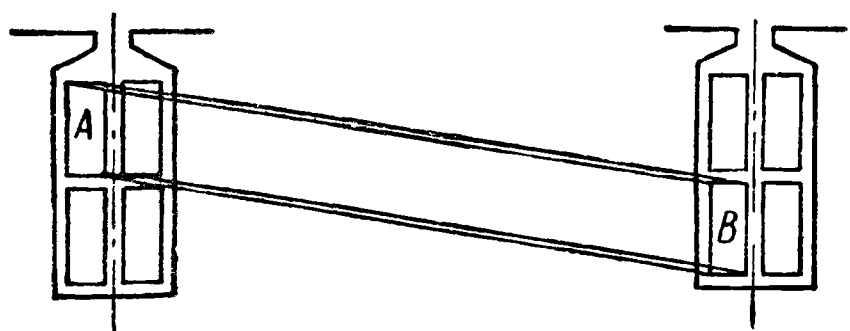
$$b_R = b'_B + \left(\varepsilon_k + u_s - \frac{a}{p}\right) \tau'_k. \quad (351)$$

Таким образом, укорочение шага обмотки  $\varepsilon_k$  ведет к увеличению ширины коммутационной зоны  $b_R$ , что является отрицательной стороной хордовой обмотки, а потому на практике, применяя хордовые обмотки из-за их ценных свойств, стараются делать укорочение  $\varepsilon_k$  возможно малым.

Основные преимущества хордовых обмоток, как мы видели, состоят в следующем: 1) уменьшение магнитной проводимости короткозамкнутых секций вследствие того, что на дуге якоря, соответствующей укорочению шага, токи в верхнем и нижнем слое обмотки идут во взаимно обратных направлениях; 2) разновременное замыкание накоротко сторон секций, лежащих вверху и внизу элементарного паза.

**147. Вычисление магнитной проводимости для пазовой части якорной секции диаметральной простой параллельной обмотки барабанного зубчатого якоря при ширине щетки, равной коллекторному делению**

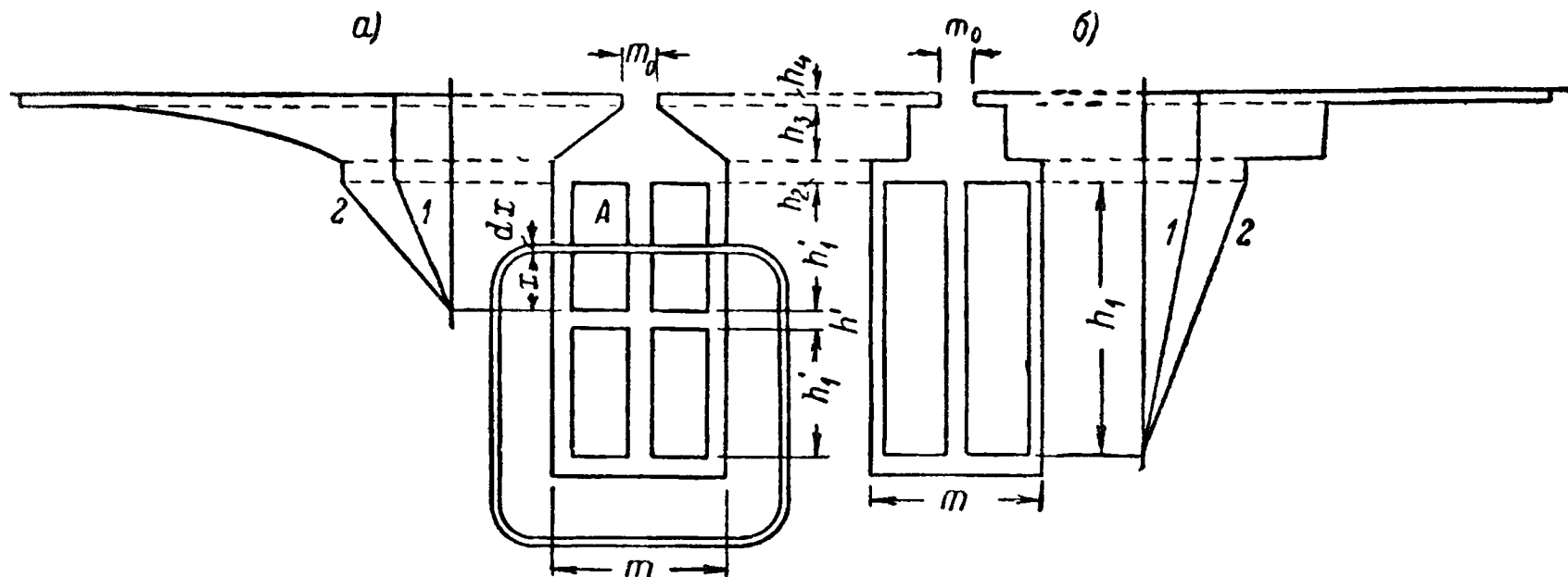
В качестве примера возьмем секцию  $AB$ , расположенную в пазах так, как показано на фиг. 207. На фиг. 208 левый из пазов, указанных на фиг. 207



Фиг. 207. Расположение секции в зубцах якоря.

представлен в увеличенном масштабе, причем показана одна из элементарных трубок магнитного потока рассеяния, создаваемого стороной  $A$ . На фиг. 208 принято, что в пазу трубка проходит перпендикулярно к ее стенкам; в действительности, при ощутимой разнице в ширине меди и ширине паза, картина будет сложнее, причем делаемое упрощение ведет к некоторому уменьшению результата вычисления проводимости; но, с другой стороны, имеются явления, которых, вследствие их сложности, мы не можем учесть, но пренебрежение которыми, несомненно должно повлиять на увеличение проводимости (например экранирование).

М. д. с., сцепляющуюся с указанной магнитной трубкой, можно принять равной м. д. с., которую создает сторона  $A$  секции, умноженной на отношение расстояния  $x$  трубки от нижней грани секции  $A$  к высоте ее  $h_1'$ . Для всех трубок, пересекающих паз выше стороны секции  $A$ , м. д. с. будет иметь одно и то же значение, а потому изменение м. д. с. для отдельных трубок, создаваемых стороной секции  $A$ , можно представить на фиг. 208, а ломаной линией 1. На этой же фигуре линией 2 показано изменение по высоте паза магнитного потока рассеяния стороны секции  $A$ .



Фиг. 208. Иллюстрация к определению самоиндукции стороны секции  $A$ .

Для элементарной трубки, показанной на фиг. 208, а, проводимость, рассчитанная на 1 см длины проводника в пазу при пренебрежении магнитным сопротивлением пути трубки в железе (стали), напишется так:

$$\lambda_{x'} = \frac{1}{m} \frac{dx}{m} = \frac{dx}{m}, \quad (352)$$

причем число сцепляющихся с трубкой витков  $w_x$  будет:

$$w_x = w_s \frac{x}{h_1'}, \quad (353)$$

где  $w_s$  — число витков в секции, размеры  $x$  и  $h_1'$  — по фиг. 208.

На основании соображений, приведенных выше (§ 141), можем ввести обозначение:

$$\lambda_x = \left( \frac{w_x}{w_s} \right)^2 \lambda_{x'} = \left( \frac{w_x}{w_s} \right)^2 \frac{dx}{m}. \quad (354)$$

Здесь  $\lambda_x$  представляет проводимость на 1 см длины трубки в осевом направлении машины, рассчитанную в предположении, что рассматриваемая трубка сцепляется со всеми витками  $w_s$  секции.

Из фиг. 208, а имеем:

$$\frac{w_x}{w_s} = \frac{x}{h_1'}.$$

Подставляя это в (354) и интегрируя в пределах от  $x = 0$  до  $x = h_1'$ , получим выражение для проводимости всех трубок, пересекающих паз на высоте  $h_1'$  стороны А:

$$\lambda_{(h_1')} = \int_0^{h_1'} \left( \frac{w_x}{w_s} \right)^2 \frac{dx}{m} = \int_0^{h_1'} \left( \frac{x}{h_1'} \right)^2 \frac{dx}{m} = \frac{h_1'}{3m}. \quad (355)$$

Для расчета проводимости трубок, пересекающих паз поверх стороны А, заменим конфигурацию паза фиг. 208, а эквивалентной ей по проводимости конфигурацией, показанной на фиг. 208, б, тогда получим:

$$\lambda_{(h_2+h_3+h_4)} = \frac{h_2}{m} + \frac{h_3}{m_3} + \frac{h_4}{m_0}. \quad (356)$$

Здесь можно принять для пазов, в которых  $\frac{m}{m_0} \approx 4$ .

$$m_3 = \frac{m+m_0}{2,3}. \quad (357)$$

Чем меньше  $\frac{m}{m_0}$ , тем ближе  $m_3$  к значению

$$m_3 = \frac{m+m_0}{2}.$$

Подставляя выражение (357) в (356), получаем:

$$\lambda_{(h_2+h_3+h_4)} = \frac{h_2}{m} + \frac{2,3 h_3}{m+m_0} + \frac{h_4}{m_0}. \quad (358)$$

Суммируя (355) и (358), имеем:

$$\lambda_{n1} = \frac{h_1'}{3m} + \frac{h_2}{m} + \frac{2,3 h_3}{m+m_0} + \frac{h_4}{m_0}. \quad (359)$$

Аналогично производим подсчет проводимости для стороны В (фиг. 209) секции:

$$\lambda_{n2} = \frac{4h_1'}{3m} + \frac{h_2}{m} + \frac{2,3 h_3}{m+m_0} + \frac{h_4}{m_0} + \frac{h'}{m}. \quad (360)$$

Сравнивая выражения для  $\lambda_{n2}$  и для  $\lambda_{n1}$ , видим, что  $\lambda_{n2} > \lambda_{n1}$ . Если взять открытый паз (фиг. 210, а) и пренебречь расстояниями  $h'$  и  $h_2$ , то получим:

$$\lambda_{n1} = \frac{h_1'}{3m}; \quad \lambda_{n2} = \frac{4h_1'}{3m},$$

т. е.†

$$\lambda_{n2} : \lambda_{n1} = 4 : 1.$$

Для открытых впадин с клином (фиг. 210, б) это отношение по опытным данным Шенфера [Л. 14] равно 2,3.

Среднее значение из  $\lambda_{n1}$  и  $\lambda_{n2}$  будет:

$$\lambda_n = \frac{1}{2}(\lambda_{n1} + \lambda_{n2}) = \frac{2,5 h_1'}{3m} + \frac{h_2}{m} + \frac{2,3 h_3}{m+m_0} + \frac{h_4}{m} + \frac{h'}{2m}. \quad (361)$$

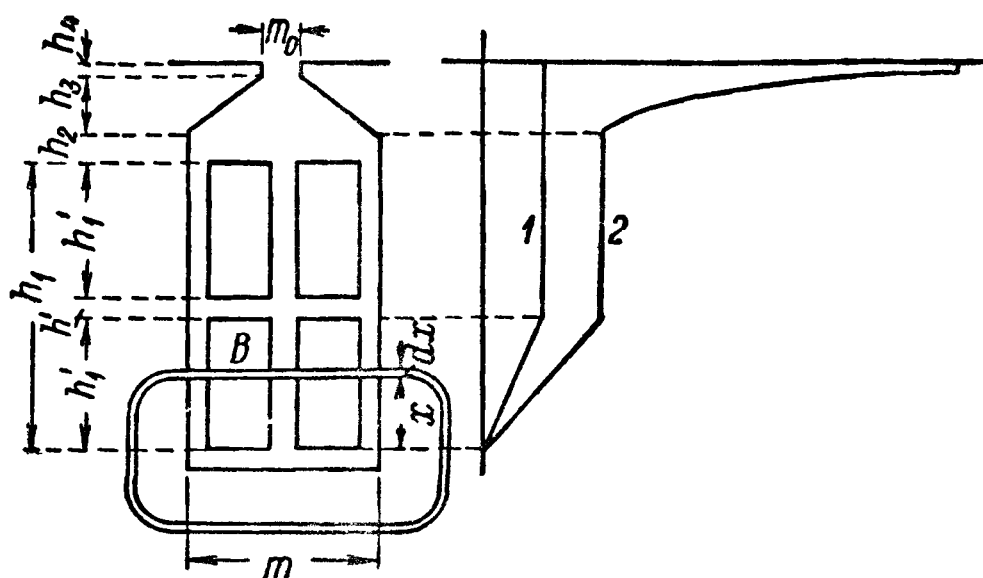


Последний член представляет столь малую величину, что им вполне можно пренебречь; тогда получим:

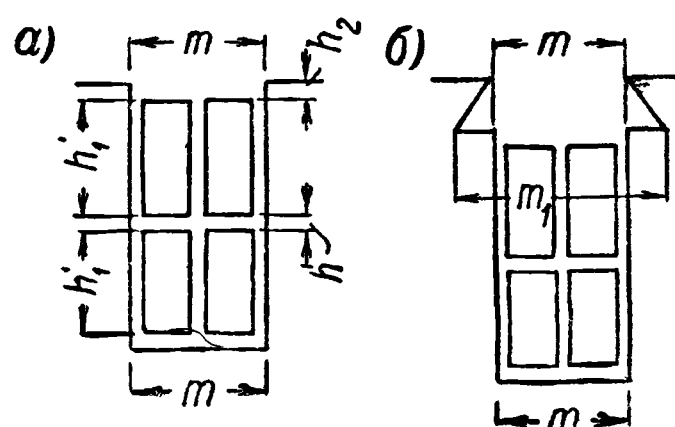
$$\lambda_n = \frac{1}{2} (\lambda_{n1} + \lambda_{n2}) = \frac{2,5 h_1'}{3m} + \frac{h_2}{m} + \frac{2,3 h_3}{m+m_0} + \frac{h_4}{m_0}. \quad (362)$$

Пользуясь фиг. 208 и 209 и поступая таким же способом, находим проводимость потоков взаимной индукции  $\lambda_M$ , которая, как уже отмечалось, должна быть для верхней  $A$  и нижней  $B$  сторон секции одинаковой:

$$\lambda_M = \frac{h_1}{2m_1} + \frac{h_2}{m} + \frac{2,3 h_3}{m+m_0} + \frac{h_4}{m_0}.$$



Фиг. 209. Иллюстрация к определению самоиндукции стороны секций  $B$ .



Фиг. 210. Открытая впадина без клина (а) и с клином (б).

Сравнивая  $\lambda_M$  с  $\lambda_{n1}$  и  $\lambda_{n2}$ , видим, что

$$\lambda_{n1} < \lambda_M < \lambda_{n2}, \quad (363)$$

при этом  $\lambda$  ближе к  $\lambda_{n1}$ , так как среднее значение проводимостей  $\lambda_{n1}$  и  $\lambda_{n2}$  больше  $\lambda_M$ :

$$\lambda_n = \frac{1}{2} (\lambda_{n1} + \lambda_{n2}) > \lambda_M. \quad (364)$$

Суммируя  $\lambda_n$  и  $\lambda_M$ , получаем проводимость паза  $\lambda_N$ , учитывающую потоки рассеяния от самоиндукции и взаимной индукции секций:

$$\lambda_N = \lambda_n + \lambda_M = 2 \left( \frac{h_1}{3m} + \frac{h_2}{m} + \frac{2,3 h_3}{m+m_0} + \frac{h_4}{m_0} \right), \quad (365)$$

где

$$h_1 = 2h_1' + h'. \quad (366)$$

Нетрудно убедиться в том, что выражение, стоящее в (365) в скобках, представляет собой проводимость для потока самоиндукции паза с однослойной обмоткой (фиг. 208, б), высота которой равна  $h_1$  (366). Обозначим эту проводимость через  $\lambda_N$ :

$$\lambda_N = \frac{h_1}{3m} + \frac{h_2}{m} + \frac{2,3 h_3}{m+m_0} + \frac{h_4}{m_0},$$

имеем

$$\lambda_N = 2\lambda_N. \quad (367)$$

В машинах постоянного тока с открытыми пазами и клиньями (фиг. 210) необходимо в четвертом члене выражения (365) заменить  $m_0$  на  $m$ , третий же член заменить на  $\frac{2h_3}{m+m_1}$ , тогда получим:

$$\lambda_N = 2 \left( \frac{h_1}{3m} + \frac{h_2}{m} + \frac{2h_3}{m+m_1} + \frac{h_4}{m} \right). \quad (368)$$

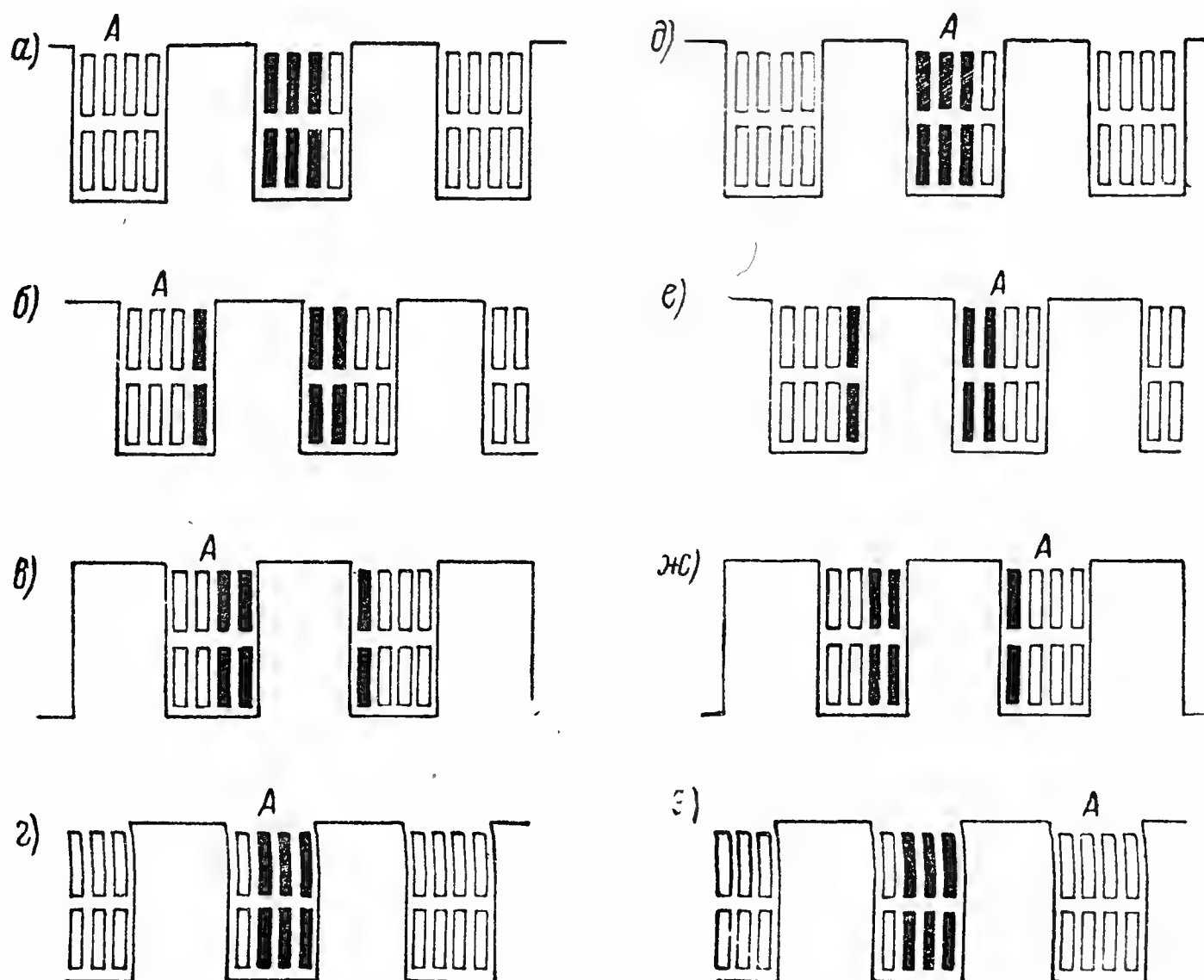
# 148. Влияние щеточного перекрытия на магнитную проводимость потоков пазового рассеяния секции якорной обмотки.<sup>1</sup>

Обозначим отношение ширины щетки  $b_B$  к коллекторному делению  $\tau_k$  через  $\gamma$ :

$$\gamma = b_B / \tau_k; \quad (369)$$

$\gamma$  будем называть коэффициентом перекрытия щеткой коллекторных делений или, сокращенно, щеточным перекрытием.

а) Предположим сначала, что  $\gamma = \text{ц. ч.}$  В этом случае число секций диаметральной обмотки, одновременно замыкаемых каждой щеткой нако-



Фиг. 211. Изменение во времени числа коммутируемых элементных впадин в одной реальной при  $\gamma = 3$ ,  $u_s = 4$ , обмотка диаметральной.

ротко, все время будет оставаться одним и тем же и равным  $\gamma$ , так как вслед за выходом из процесса коммутации одной секции ее заменяет следующая. Число  $\gamma$  будет в то же время и числом элементных пазов, одновременно находящихся в процессе коммутации; что же касается числа одновременно коммутируемых элементных пазов данного реального паза (обозначим его через  $\kappa$ ), то оно будет все время изменяться.

В качестве примера на фиг. 211 показан ряд последовательных моментов времени, отличающихся друг от друга на время, соответствующее повороту якоря на одно коллекторное деление; на фиг. 211 предположено  $u_s = 4$ ,  $\gamma = 3$ , обмотка — диаметральной.

Проследивая паз  $A$ , видим, что в данном случае  $\kappa$  принимает значения 1, 2, 3, 3, 2, 1, причем общее число одновременно коммутируемых элементных пазов все время остается одним и тем же и равным  $\gamma = 3$ .

Ранее указывалось, что пазовая магнитная проводимость  $\Lambda_N$  одноэлементного паза при двуслойной обмотке с диаметральной шагом, в которой одновременно замыкаются накоротко нижняя и верхняя индуцируемые

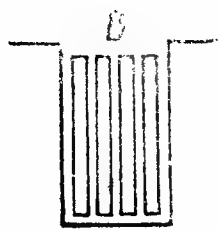
<sup>1</sup> Под потоками пазового рассеяния понимаются потоки самоиндукции и взаимной индукции, возникающие на длине  $2l_s$  пазовых частей секции.

стороны, лежащие в одном и том же элементарном пазу, равна удвоенной магнитной проводимости  $\lambda_N$  однослойной обмотки ( $A_N = 2\lambda_N$ ), у которой высота индуктируемой стороны  $h_1$  определяется по формуле (366):

$$h_1 = 2h_1' + h'.$$

Поэтому паз  $A$  (фиг. 211) можно заменить пазом  $B$ , представленным на фиг. 212.

На фиг. 213,  $a—г$  для каждого из элементарных пазов (фиг. 211) реальной пазы  $A$  при диаметральной обмотке построена диаграмма коммутации в предположении прямолинейной коммутации. Началом периода коммутации каждого



Фиг. 212.  
Замена пазы  $A$  (фиг. 211) новым однослойным пазом.

из 4 элементарных пазов, составляющих реальный паз  $A$  (фиг. 211) сдвинуто относительно начала периода коммутации предшествующего элементарного пазы на время, соответствующее повороту якоря на одно коллекторное деление. Первой начинаются коммутироваться элементарная впадина 4 (фиг. 213,  $a$ ), а так как  $\gamma = 3$ , то конец периода коммутации этого элементарного пазы (вертикаль 4') совпадает с началом коммутации элементарного пазы 1 (фиг. 213,  $г$ ).

На каждой из фиг. 213,  $a—г$  построен, кроме того, прямоугольник, высота которого равна  $A_N$  — пазовой проводимости двуслойной диаметральной обмотки для потоков рассеяния секции, а основание равно периоду коммутации  $T$ , т. е. соответствует приведенной к диаметру якоря ширине щетки  $b'_B$  (338).

На фиг. 213,  $д$  все четыре прямоугольника, построенных на фиг. 213,  $a—г$ , придвинуты друг к другу вплотную; полученная таким образом фигура построена на фиг. 213,  $е$  к оси абсцисс. Основание фигуры будет, очевидно, соответствовать периоду коммутации пазы  $T_N$ . Ординаты фигуры  $abcde fgh$  дадут характер изменения результирующей магнитной проводимости  $A_{NR}$  за период  $T_N$ . Однако нас интересует изменение  $A_{NR}$  в течение периода коммутации каждой из 4 секций, что дают фиг. 213,  $ж—к$ ; основание каждого из них соответствует периоду коммутации  $T$  каждой из 4 секций.

Обозначив для каждой секции отношение среднего значения высоты фигуры, представляющей изменение во времени величины  $A_{NR}$  к величине  $A_N$  через  $\kappa$  индексом, соответствующим номеру секции, находим по фиг. 213,  $ж—к$

$$\bar{\kappa}_4 = 2; \quad \bar{\kappa}_3 = 2 \frac{2}{3}; \quad \bar{\kappa}_2 = 2 \frac{2}{3}; \quad \bar{\kappa}_1 = 2.$$

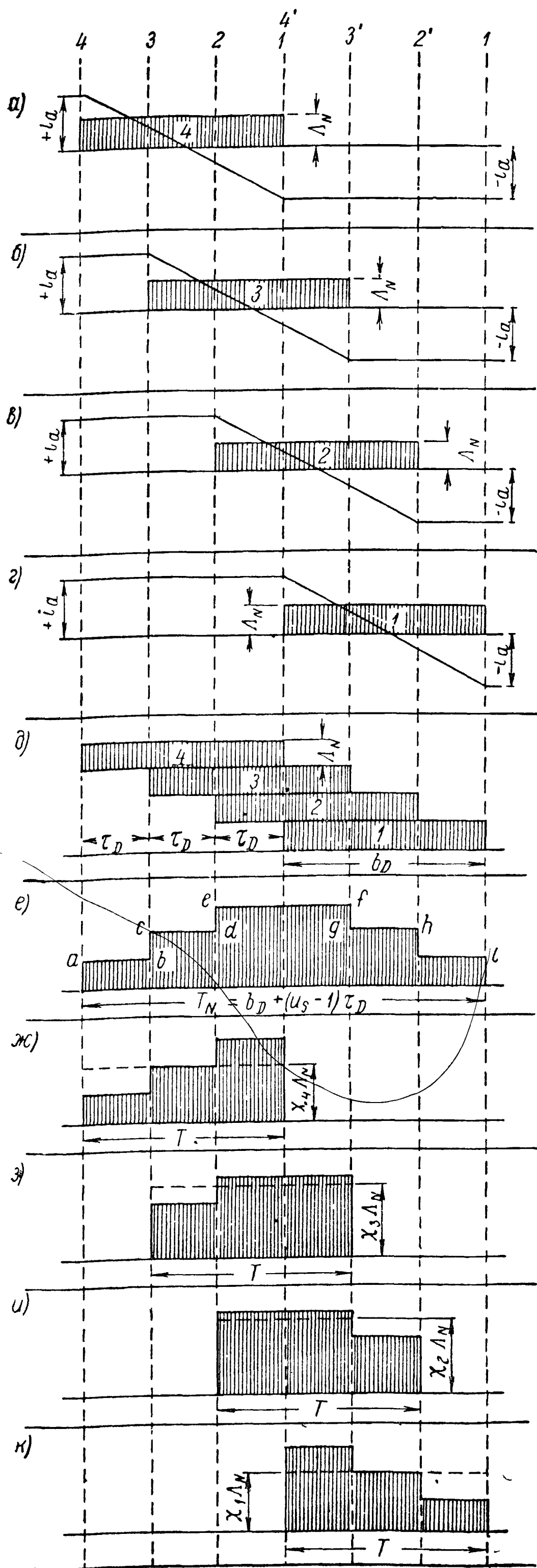
Следовательно, среднее значение  $A_{NR}$  для всех четырех секций, выраженное в долях  $A_N$ , будет:

$$\bar{\kappa} = \frac{2 + 2 \frac{2}{3} + 2 \frac{2}{3} + 2}{4} = 2 \frac{1}{3} = 2,333. \quad (370)$$

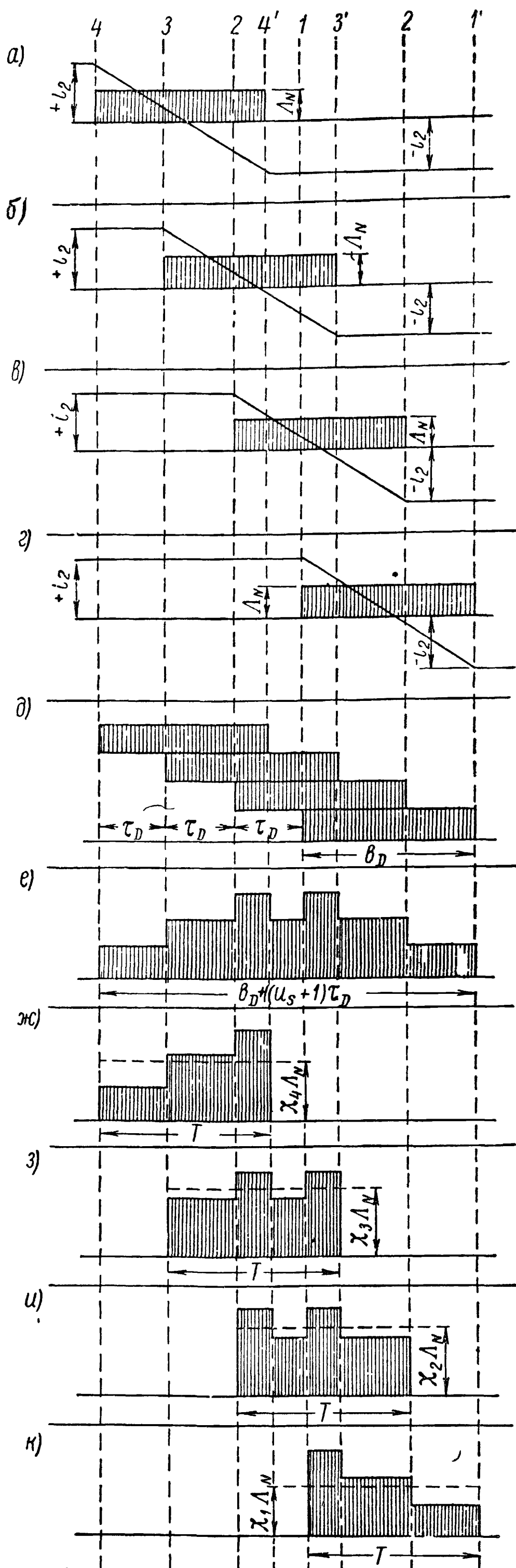
Если бы мы взяли среднее значение  $\bar{\kappa}'$  из фиг. 213,  $е$ , то получили бы значение  $\bar{\kappa}' = 2$ , меньшее, чем по (370).

В рассмотренном примере диаметральной обмотки  $\gamma$  равно целому числу ( $\gamma = 3$ ). Взяв для диаметральной обмотки ( $\epsilon_k = 0$ )  $u_s = 4$ , кратность перекрытия  $\gamma = 2,5$ , получим фиг. 214, которая построена так же, как и фиг. 213. Из фиг. 214 имеем:

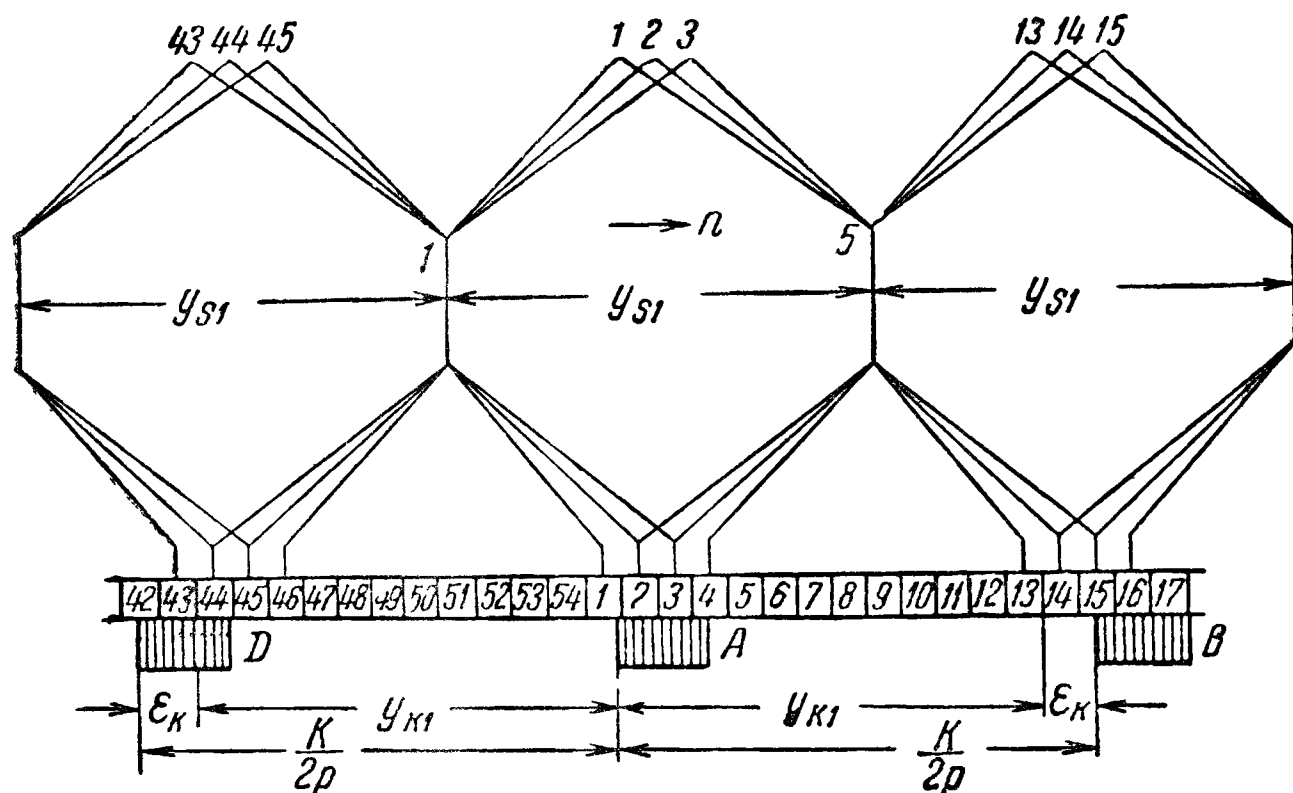
$$\begin{aligned} \bar{\kappa}_4 &= 1 \frac{4}{5}; \quad \bar{\kappa}_3 = 2 \frac{2}{5}; \quad \bar{\kappa}_2 = 2 \frac{2}{5}; \quad \bar{\kappa}_1 = 1 \frac{4}{5}; \\ \bar{\kappa} &= \frac{1 \frac{4}{5} + 2 \frac{2}{5} + 2 \frac{2}{5} + 1 \frac{4}{5}}{4} = 2,1; \\ \bar{A}_{NR \text{ med}} &= \bar{\kappa} A_N = 2,1 A_N. \end{aligned} \quad (371)$$



Фиг. 213. Последовательные моменты коммутации при  $u_s = 4$ ,  $\gamma = 3$ ,  $\epsilon_k = 0$ .



Фиг. 214. Последовательные моменты коммутации при  $u_s = 4$ ,  $\gamma = 2.5$ ,  $\epsilon_k = 0$ .

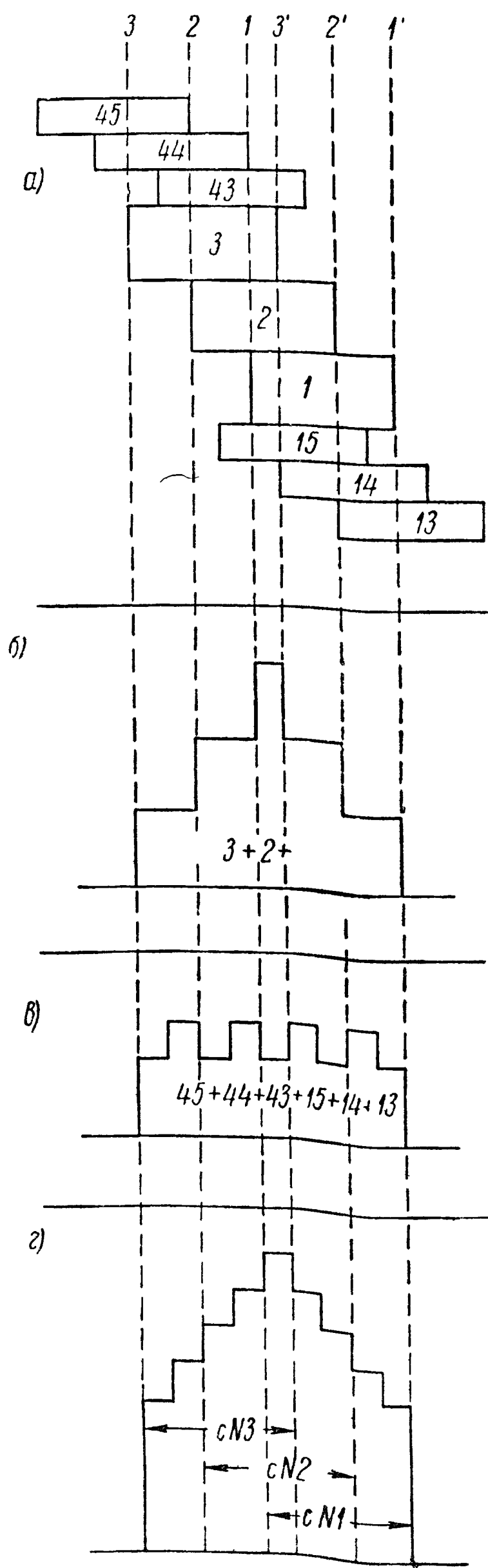


Фиг. 215. Простая параллельная обмотка при  $u_s = 3$ ,  $\gamma = 2,5$ ,  $\epsilon_k = 1,5$ .

Непосредственно из фиг. 214, е получаем среднее значение  $\bar{\kappa}' = 1,818$ , т. е. опять меньше, чем по (371)

б) Возьмем теперь правую равносекционную простую параллельную обмотку с укорочением шага  $\epsilon_k = 1,5$  (фиг. 215) при  $u_s = 3$  и  $\gamma = 2,5$ . Так как обмотка правая, то правая сторона каждой секции лежит в нижнем слое паза, а левая — в верхнем слое. Рассмотрим секцию № 3, коммутируемую щеткой А. Индуцируемая сторона секции, лежащая непосредственно под левой стороной рассматриваемой 3-й секции, принадлежит другой секции (45-й), которая замыкается накоротко левой смежной щеткой D, причем период коммутации 45-й секции, по сравнению с 3-й секцией, при правом вращении машины начинается и кончается раньше на время, соответствующее повороту якоря на  $\epsilon_k = 1,5$  коллекторной пластины. При том же правом вращении якоря индуцируемая сторона, лежащая над правой стороной секции № 1, принадлежит секции № 13, которая коммутируется правой смежной щеткой B, причем начало и конец периода коммутации наступает для секции № 13 позже на время, соответствующее повороту якоря на  $\epsilon_k = 1,5$  коллекторной пластины.

Мгновенные значения проводимости для результирующего потока рассеяния данных секций можно найти построением сдвинутых друг относительно друга прямоугольников, как это сделано на фиг. 216, а, для секций, лежащих своими левыми сторонами в верхнем слое впадины № 1, а правыми в нижнем слое впадины № 5 (фиг. 215). Прямоугольники 1, 2 и 3 соответствуют проводимостям потоков самоиндукции упомянутых трех



Фиг. 216. Последовательные моменты коммутации при  $u_s = 3$ ,  $\gamma = 2,5$ ,  $\epsilon = 1,5$



секций; они сдвинуты друг относительно друга на  $\tau'_k$  в направлении вращения машины; высота каждого из прямоугольников равна  $\lambda_{n1} + \lambda_{n2} = 2\lambda_n$ .

Остальные прямоугольники соответствуют проводимостям потоков взаимной индукции сторон секций, замыкаемых накоротко смежными щетками. Высота каждого из них равна  $\lambda_M$ , как мы видели выше.  $\lambda_M < \lambda_n$ , но ради упрощения мы примем, что  $\lambda_M \approx \lambda_n$ . Подсчеты убеждают, что ошибка в худшем случае будет не более 10%. Тогда  $2\lambda_n = \lambda_n + \lambda_M = \lambda_N$ .

Прямоугольники 45, 44 и 43, расположенные на фиг. 216, а вверху, соответствуют сторонам секций, лежащих внизу впадины № 1, т. е. коммутируемых щеткой D. Прямоугольники 15, 14 и 13, расположенные на фиг. 216, а внизу, соответствуют сторонам секций, которые лежат вверху впадины № 5, т. е. коммутируемых щеткой B. На фиг. 216, б сумма больших прямоугольников, а на фиг. 216, в сумма маленьких прямоугольников перестроены к оси абсцисс; на фиг. 216, г произведено сложение обеих фигур между ординатами, соответствующими началу коммутации 3-й и концу коммутации 1-й из секций, коммутируемых щеткой A.

Проводимости для потока рассеяния, сцепляющегося с каждой из секций, будут изменяться за период коммутации  $T$  по-разному. Так, изменению проводимости секций № 3, № 2 и № 1 соответствуют участки кривой на фиг. 216, г, лежащие между вертикалями 3 и 3', 2 и 2' 1 и 1'.

в) Прделаав такие же построения для разных реальных пазов, имеющих разное число элементарных пазов  $u_s$  при разных перекрытиях  $\gamma$  и разных укорочениях шага обмотки  $\epsilon_k$ , можно установить, что у реальных машин с параллельными обмотками и с  $\gamma > 1$  и  $\epsilon_k > 1$  нет большой разницы между средним значением  $\lambda_N$  и его максимальным значением. Вывод можно распространить и на множественные параллельные обмотки и на множественные последовательные обмотки с полным числом щеток на коллекторе.

Построение результирующих значений  $\lambda_{NR}$  для ступенчатых обмоток показывает, что у них эта разница уменьшается, в чем и заключается их преимущество.

#### 149. О проводимости для потоков рассеяния лобовых соединений якорной обмотки

Несколькими авторами было показано, что проводимость лобовых соединений якорной обмотки можно считать постоянной по величине, а потому она не может влиять на разницу между средним и максимальным значением проводимости секции, увеличивая их одинаковым образом.

#### 150. Выводы

Применительно к общему случаю коммутируемой машины, с любым  $u_s$ ,  $\gamma$ , и  $\epsilon_k$ , в предположении, что коммутационный ток изменяется по прямой линии, мы можем, очевидно, подбирать величину поля, создаваемого добавочными полюсами, так же, как мы это делали для упрощенного случая коммутируемой машины с  $\gamma = 1$ , но за э. д. с.  $e_R$  брать ее среднее значение. Таким образом, вопрос сводится к нахождению среднего значения э. д. с.  $\overline{e_R}$ .

Среднее значение э. д. с. было определено многими авторами. Треттин дает значения для параметра  $\zeta$ , входящего в формулу для среднего значения  $e_R$ , приведенные в табл. 18.

В предварительных расчетах можно брать  $\zeta = 5$ . При желании определить  $\zeta$  более точно можно по Треттину пользоваться формулой:

$$\zeta = 0,6 \frac{h}{b} + \frac{l_s}{l_\delta} + \frac{500}{ASl_\delta \omega_s v_a}, \quad (372)$$

где  $h$  и  $b$  — высота и ширина впадины; эта формула дает  $\zeta$  с ошибкой не более  $\pm 20\%$ . Регулирование добавочных полюсов для получения надлежащей компенсации  $e_R$  э. д. с.  $e_w$  производится затем опытным путем, как изложено дальше.

Таблица 18

Средние значения  $\zeta$  по Треттину [Л 18]

Маленькие и средние машины с проволочной обмоткой . . . . .	$\zeta = 6-7$ при $\delta_w^1 = 2-5$ мм
Средние машины с прямоугольными стержнями ( $w_s = 1$ ) . . . . .	$\zeta = 5-6$ при $\delta_w = 4-8$ мм
Тяговые и крановые двигатели . . . . .	
Большие машины, тихоходные, небольшой длины . . . . .	$\zeta = 6-8$ при $\delta_w = 6-10$ мм
Большие машины, тихоходные, большой длины . . . . .	$\zeta = 3,8-4,5$ при $\delta_w = 10-25$ мм
Большие машины, быстроходные . . . . .	$\zeta = 4-5$ при $\delta_w = 12-30$ мм

<sup>1</sup>  $\delta_w$  — длина воздушного зазора под добавочным полюсом

## Г. ОПЫТНАЯ НАЛАДКА КОММУТАЦИИ

## 151. Способы измерений

Выше мы показали, что в общем случае можно поступать так же, как и в теоретическом случае, т. е. стремиться к взаимокompенсации среднего значения  $e_R$  э. д. с.  $e_w$  от добавочных полюсов. Однако важно знать, будут ли условия коммутации благоприятными не только при номинальной нагрузке, но и при нагрузках, отличающихся от номинальной, а это, как показывает опыт, не всегда имеет место. По этой причине встает вопрос об опытной проверке коммутации.

Для проверки коммутации имеются два способа: 1) способ снятия потенциальных диаграмм по коллектору и 2) способ определения зоны безискровой коммутации. В настоящее время второй способ получил всеобщее признание. Сущность его сводится к тому, что при его помощи отыскивают наиболее благоприятные условия коммутации при всех нагрузках, от холостого хода до номинальной, определяют верхний и нижний пределы тока в обмотке добавочных полюсов, между которыми коммутация остается темной. Область, ограниченная этими пределами, и представляет собой «область безискровой коммутации», за пределами которой работа машины остается невозможной. На практике кривые, ограничивающие безискровую коммутацию, носят название кривых подпиток добавочных полюсов.

Метод был разработан и применен на заводе «Электросила» В. Т. Касьяновым и вошел во всеобщее применение [Л. 19]

## 152. Способ подпитки добавочных полюсов

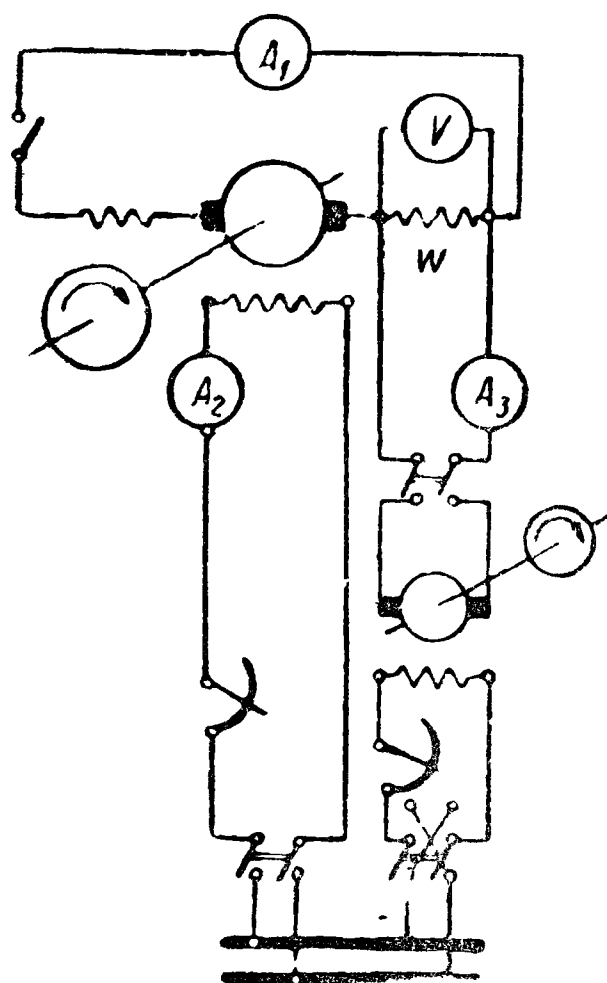
Опыт обычно производится по схеме фиг. 217 [Л. 20]. На схеме указано параллельное приключение к обмотке добавочных полюсов испытуемой машины постоянного тока другой машины, рассчитанной на ток, составляющий не более 10% от номинального тока испытуемой машины; возбуждение испытуемой машины и вспомогательной делают независимым, при этом в цепь возбуждения последней включается переключатель направления возбуждения. Очень удобно, если амперметр  $A_3$  имеет шкалу с нулем посередине; тогда при изменении направления возбуждения вспомогательной машины его не нужно переключать. Полезно также иметь вольтметр  $V$ , приключенный к обмотке добавочных полюсов испытуемой машины, чтобы иметь возможность в любой

момент проверить, совпадает ли дополнительный ток в обмотке  $W$  с основным током (положительное питание) или они направлены навстречу друг другу (отрицательное питание)

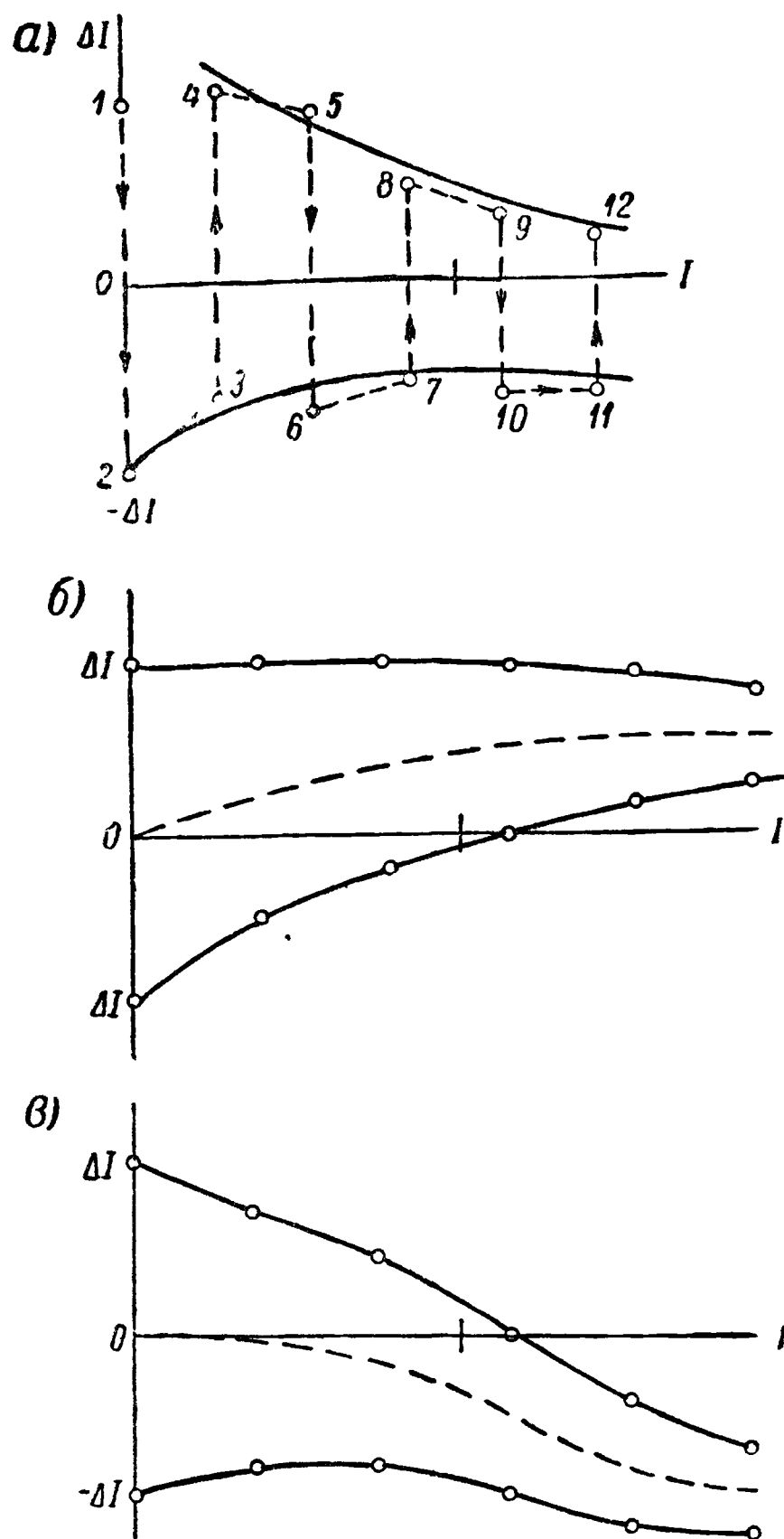
При холостом ходе испытуемой машины начинаем питать обмотку возбуждения током  $\Delta I$ , увеличивая его до тех пор, пока под сбегающим краем определенной щетки не появится первая искра, полученное предельное значение  $\Delta I$  откладываем на графике  $\Delta I = f(I)$  (фиг. 218, а, точка 1)

После этого начинаем уменьшать добавочный ток в обмотке добавочных полюсов, причем можно заметить, что искра гаснет не сразу и погасить ее удастся только после соответствующего изменения тока.

После этого питание обмотки снижаем до нуля, направление его изменяем на обратное и увеличиваем до тех пор, пока не по-



Фиг. 217. Схема подпитки добавочных полюсов



Фиг. 218. Кривые подпитки добавочных полюсов а — добротные; б — требуется усиление добавочных полюсов, в — требуется ослабление добавочных полюсов.

вторится искра, — получаем точку 2. Заметим, что величины токов, отвечающие точкам 1 и 2, должны быть, примерно, одинаковыми, только в этом случае можно считать, что все обстоит благополучно; особенно следует опасаться налета меди на рабочих поверхностях щеток одной полярности.

Не изменяя направления тока в обмотке добавочных полюсов, нагружаем машину примерно током в 20—25% от номинального. Если одновременно будет замечено, что искрение начинает увеличиваться, нужно добавочный ток  $\Delta I$  уменьшить, не давая искрению развиваться, так как вызвать его много легче, чем потушить.

Действуя таким же образом, проводим опыт дальше и получаем точки 3, 4, 5, 6 и т. д.

При вполне добротной коммутации обе кривые подпитки, при  $+\Delta I/I_N$  и при  $-\Delta I/I_N$ , будут симметричны относительно оси абсцисс (фиг. 218, а).

Вообще можно сказать, что выбор добавочных полюсов сделан тем удачнее, чем ближе средняя линия между обеими кривыми к оси абсцисс.

Если кривые подпитки получаются вида фиг. 218, б, то можно сказать, что требуется усиление добавочных полюсов вспомогательным током; если они получаются, как на фиг. 218, в, то требуется ослабление добавочных полюсов.

### 153 Регулирование добавочных полюсов

Если снятые кривые подпитки показывают, что добавочные полюсы чересчур сильны (фиг. 218, в) или чересчур слабы (фиг. 218, б), то число витков на них нужно либо уменьшить, либо увеличить в отношении

$$\Delta w = \frac{I_N + \Delta I}{I_N} W_w.$$

Однако на практике это вызывает большие затруднения, в особенности в крупных машинах на большой ток с небольшим числом витков  $W_w$  из толстой меди, так как число витков должно быть на пару полюсов целым. Поэтому изменение числа  $W_w$  можно предпринимать только тогда, когда оно достаточно велико, но это бывает только у машин небольшой мощности относительно высокого напряжения, когда обмотка добавочных полюсов выполнена проволокой. В больших машинах с обмоткой добавочных полюсов прямоугольного сечения на такое мероприятие можно идти только в том случае, если имеется значительная ошибка в  $W_w$ .

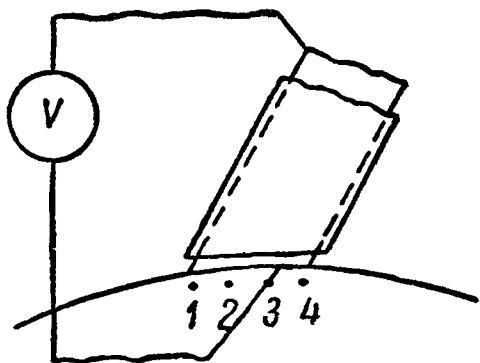
Обычным способом регулирования добавочных полюсов является изменение зазора посредством прокладок между сердечником полюсов и ярмом. Чем меньше зазор, тем сильнее действие добавочных полюсов, и наоборот. Этот способ регулирования дает хорошие результаты только при малых изменениях зазора  $\delta_w$ . При значительных изменениях нарушается картина распределения магнитного поля добавочного полюса. Так, при увеличении  $\delta_w$  поле становится менее пологим в верхней части, т. е. нарушается среднее значение его под полюсом. В этом случае, вынимая магнитные прокладки, нужно заменять их другими, немагнитными. Тогда ослабление магнитного поля будет происходить под всем магнитным полюсом. Результат каждого изменения добавочного полюса нужно проверять снятием кривых подпитки.

В тех случаях, когда указанное мероприятие не дает надлежащих результатов, прибегают к шунтированию обмотки добавочных полюсов соответствующим сопротивлением, подбирая его с тем же отношением постоянных  $x$  и  $r$ , какое имеется у обмотки полюсов. В противном случае шунт будет при быстром изменении тока нагрузки действовать неправильно: ток не будет ответвляться в шунт в надлежащей пропорции.

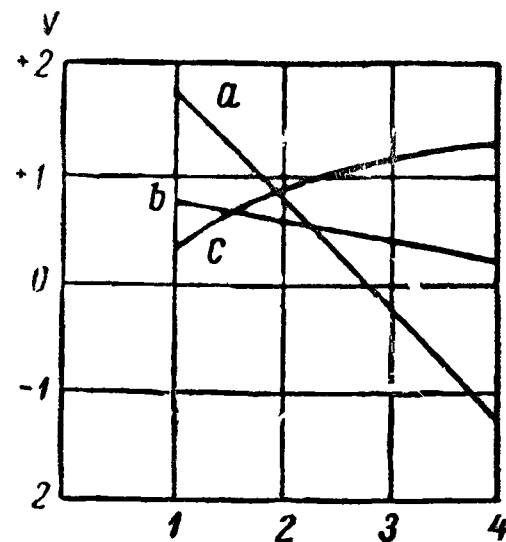
### 154. Способ снятия кривой падения напряжения под щеткой

Этот способ исследования добротности коммутации ныне вытеснен более совершенным способом кривых подпиток (§ 151). Способ состоит в снятии кривой падения напряжения под щеткой путем использования схемы фиг. 219. Вольтметр приключается одним концом к верху щетки, где падения напряжения вдоль щетки нет, а второй конец последовательно присоединяется к равноотстоящим точкам по дуге коллектора посредством вспомогательной щетки. Если, при производстве измерений на положительной щетке, положительный зажим вольтметра присоединен к вспомогательной щетке, а отрицательный к верху ее, то положительный отсчет по вольтметру в случае генератора покажет, что падение напряжения положительно, и наоборот. В соответствии с этим наносим результаты измерений на диаграмму (фиг. 220). В случае двигателя, в котором через положительную щетку ток входит, а не выходит как в генераторе, присоединение вольтметра должно быть обратное.

Вспомогательную щеточку можно заменить рукояткой с иглой и установку ее производить не по наружной рабочей поверхности коллектора, во избежание рисков, а по торцевой. Если ординаты кривой падения напряжения под щеткой при переходе от точки 1 (набегающий край щетки) к точке 4 падают, то поле добавочных полюсов слишком сильно (кривая *a*, фиг. 220), т. е. машина перекоммутирована. Нормально поле добавочных полюсов должно быть так подо-



Фиг. 219. Схема соединений при снятии кривых падения напряжения под щеткой.



Фиг. 220. Кривые падения напряжения под щеткой.

брано, чтобы при номинальной нагрузке имелось небольшое перекоммутирование (кривая *a*), при условии возможности насыщения добавочных полюсов при перегрузках.

#### Д. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ ДОБАВОЧНЫХ ПОЛЮСОВ

### 155. Исходное уравнение

По причинам, указанным в гл V (§ 116), можно при расчете добавочных магнитных полюсов не обращать внимания на присутствие основных магнитных полюсов. Делая ферромагнитные участки пути магнитного потока добавочных полюсов ненасыщенными, мы можем пренебречь ампервитками  $AW_{w\Sigma}$  на проведение потока по этим участкам и пользоваться для расчета обмотки возбуждения добавочных полюсов формулой:

$$AW_w = AW_{wq} + AW_{w\delta} \quad (373)$$

Ампервитки  $AW_{wq}$ , которые идут на компенсацию поперечных ампервитков реакции якоря [формула (243) при  $b = 0$ ], определяется выражением:

$$AW_{wq} = \tau AS.$$

Расчет ампервитков  $AW_{w\delta}$  можем произвести по формуле (71), которая была выведена нами для аналогичных ампервитков основного магнитного потока:

$$AW_{w\delta} = 1,6 k_{w1} \delta_w B_{w\delta}.$$

Здесь  $\delta_w$  — величина зазора под добавочным полюсом;  $B_{w\delta}$  — индукция в этом зазоре;  $k_{w1}$  — коэффициент зубчатости, учитывающий увеличение сопротивления воздушного зазора из-за зубчатого строения якоря. Этот коэффициент можно вычислить по формуле (73):

$$k_{w1} = \frac{t_1 + 5\delta_w t_1 / b_n}{Z_1 + 5\delta_w t_1 / b_n}.$$



Индукция  $B_{w\delta}$  определяется из того условия, что э. д. с.  $e_w$ , индуцируемая в короткозамкнутой секции от перерезывания потока добавочных полюсов  $\Phi_w$ , должна компенсировать реактивную э. д. с.  $e_R$ .

$$\bar{e}_R = 2\omega_s v l_\Sigma AS\zeta \cdot 10^{-8}. \quad (374)$$

Для э. д. с.  $e_w$  можем, согласно (325), написать:

$$e_w = 2\omega_s v l_{w\delta} B_{w\delta} \cdot 10^{-8}, \quad (375)$$

если через  $l_{w\delta}$  обозначим теоретическую длину полюсного башмака добавочного полюса, т. е. ту длину, на которой проводники обмотки якоря находятся под воздействием потока  $\Phi_w$ . Приравнивая правые части формул (374) и (375), получаем:

$$2\omega_s v l_\Sigma AS\zeta \cdot 10^{-8} = 2\omega_s v l_{w\delta} B_{w\delta} \cdot 10^{-8},$$

откуда

$$l_\Sigma AS\zeta = B_{w\delta} l_{w\delta}. \quad (376)$$

Это уравнение является основным для выяснения роли добавочных полюсов и для их расчета. Задаваясь индукцией  $B_{w\delta}$  и пользуясь для  $\zeta$  опытными данными, приведенными в § 149, можем найти по (376) теоретическую длину башмака добавочного полюса  $l_{w\delta}$ .

Практически берут

$$B_{w\delta} = 2000 \div 5000 \text{ гс}. \quad (377)$$

причем желательно придерживаться низшего предела.

### 156. Определение размеров полюсного башмака добавочного полюса

Обозначив действительную длину добавочного полюса через  $l_w$ , можем положить

$$l_{w\delta} = l_w + 3\delta_w - n'_v b_v, \quad (378)$$

здесь  $n'_v$  — число радиальных вентиляционных каналов якоря, приходящихся на длину  $l_w$ ,  $b_v$  — ширина канала.

При указанных выше (377) значениях  $B_{w\delta}$  действительная длина добавочного полюса  $l_w$  в небольших машинах (мощностью до 50 кВт) получается по формуле (378) в пределах  $(1/2 - 2/3)$  длины  $l_\Sigma$ . В машинах большей мощности делают

$$l_w = l_p, \quad (379)$$

тогда можно положить

$$l_{w\delta} \approx l_\Sigma. \quad (380)$$

Индукция  $B_{w\delta}$  в этом случае вычисляется по (376) и проверяется по (377).

Теоретическая ширина добавочного полюса  $b_{w\delta}$  должна быть выбрана таким образом, чтобы в течение всего периода коммутации секция находилась в надлежащем поле.

Дуга, проходимая сторонами секции по окружности якоря за период коммутации, равна ширине коммутационной зоны секций паза  $b_R$  (351). Воздействию добавочного полюса должна подвергаться эта дуга. Отсюда находим:

$$b_{w\delta} = b_R. \quad (381)$$

Если действительную ширину полюса обозначим через  $b_w$ , то приближенно можно получить

$$b_{w\delta} = b_w + 3\delta_w. \quad (382)$$

Практически  $b_{w\delta}$  составляет обычно от 9 до 15% полюсной дуги.

### 157. Расчет сердечника добавочного полюса

Поток, выходящий из добавочного полюса,

$$\Phi_w = B_{w\delta} l_{w\delta} b_{w\delta}. \quad (383)$$

Если коэффициент магнитного рассеяния добавочных полюсов обозначить через  $\sigma_w$ , то для потока, проходящего по сердечнику полюсов, получим следующее выражение:

$$\Phi_{wm} = \sigma_w \Phi_w. \quad (384)$$

Для того чтобы сердечник полюса не был насыщен, нужно брать для полной нагрузки машины индукцию

$$B_{wm} = 10\,000 \div 12\,000 \text{ гс}. \quad (385)$$

Задаваясь  $B_{wm}$ , находим сечение сердечника добавочного полюса:

$$S_{wm} = \frac{\Phi_{wm}}{B_{wm}}. \quad (386)$$

Длину сердечника  $l_{wm}$  обычно делают несколько короче длины полюсного башмака  $l_w$ : выступающие края последнего служат при этом для укрепления возбуждающих катушек полюсов. Задавшись длиной  $l_{wm}$ , находим ширину добавочного полюса:

$$b_{wm} = \frac{S_{wm}}{l_{wm}}. \quad (387)$$

Если размер  $b_{wm}$  получается неконструктивным вследствие малости, то его увеличивают, пересчитывая соответственно  $S_{wm}$  и  $B_{wm}$ . Если, наоборот, имеющееся место не позволяет придать  $b_{wm}$  надлежащий размер, то сердечник делают уширяющимся в направлении к ярму. Подобные случаи имеют место тогда, когда машина должна выдерживать значительные перегрузки. В такой машине указанные в (385) предельные значения  $B_{wm}$  должны соответствовать требуемой перегрузке машины, вследствие чего для номинальной нагрузки машины индукция  $B_{wm}$  получается соответственно меньше, а сердечник приходится делать соответственно шире.

### 158. Коэффициент магнитного рассеяния добавочных полюсов

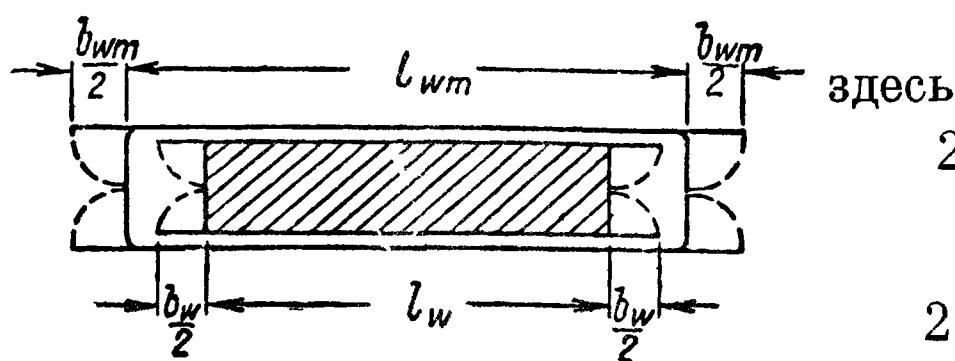
Вычисление потоков добавочных полюсов мы будем производить, не обращая внимания на наличие на основных магнитных полюсах намагничивающих обмоток, так как мы условились обе цепи, основных и добавочных полюсов, рассчитывать независимо (§ 116). Насыщением сердечников основных полюсов мы также можем пренебречь; в действительности насыщение их будет вызывать с одной стороны добавочных полюсов увеличение потоков рассеяния, с другой — уменьшение; эти два воздействия не полностью компенсируют друг друга, однако разница столь незначительна, что ее можно в расчет не принимать.

По сравнению с рассеянием основных полюсов, рассеяние добавочных полюсов очень велико; обычные значения коэффициента  $\sigma_w$  лежат в пределах от 1,5 до 3, но нередки случаи, когда  $\sigma_w$  достигает 4 и даже 5. Объясняется это тем, что добавочные полюсы должны преодолевать полные ампервитки якоря  $\tau AS$ , направленные навстречу ампервиткам добавочных полюсов, вследствие этого на добавочных полюсах приходится иметь большое число ампервитков, примерно на 20—40% больше, чем на якоре.

При подсчете потоков рассеяния для основных полюсов мы разбивали эти потоки на внутренние и внешние (§ 62). Под последним подразумевались потоки

рассеяния с лобовых поверхностей полюсных сердечников и башмаков. В добавочных полюсах поперечные размеры сердечника и башмака ( $b_{wm}$  и  $b_{w\delta}$  по сравнению с размерами их по оси машины ( $l_{wm}$  и  $l_w$ ) очень малы, причем последние, кроме того, обычно меньше соответствующих размеров основных полюсов. Это обстоятельство позволяет несколько упростить задачу и вести подсчет только внутренних потоков рассеяния, увеличив, как показано на фиг. 221, соответствующие поверхности для внутренних потоков рассеяния за счет отогнутых под углом  $90^\circ$  лобовых поверхностей.

Внутренние потоки рассеяния добавочных полюсов можно подсчитать теми же методами, какие применяются при подсчете их для основных полюсов. Остановившись на методе Арнольда, разобьем внутренние потоки на три части:



Фиг. 221. Иллюстрация к способу учета лобовых потоков рассеяния добавочных полюсов.

$$\Phi_{ws} = 2(\Phi_{w1} + \Phi_{w2} + \Phi_{w3}); \quad (388)$$

- здесь
- $2 \Phi_{w1}$  — потоки рассеяния между полюсным башмаком, добавочного полюса и основными полюсами;
  - $2 \Phi_{w2}$  — потоки рассеяния между сердечником добавочных полюсов и основными полюсами;
  - $2 \Phi_{w3}$  — потоки рассеяния между сердечником добавочного полюса и ярмом.

Предполагая, что обмотка добавочных полюсов распределена по их сердечнику равномерно, можем сказать, что м. д. с., создаваемая этой обмоткой, растет по прямой линии от основания полюсов (у ярма), где она равна нулю, до своего полного значения у полюсного башмака.

Коэффициент 2 в формуле (388) учитывает симметрию потоков относительно плоскости, проведенной через ось машины и полюсов.

Подсчет потоков будем вести по общей формуле, аналогичной формуле (123):

$$\Phi_{wx} = F_{wx} \lambda_{wx}, \quad (389)$$

где  $F_{wx}$  — м. д. с., а  $\lambda_{wx}$  — магнитная проводимость между двумя рассеивающими поверхностями.

1) Поток  $\Phi_{w1}$  между полюсным башмаком добавочного полюса и основным полюсом. Пользуясь обозначениями, приведенными на фиг. 221 и 222, можем написать:

$$\lambda_{w1}' = \frac{a_1' (l_w + b_w + l_p) \frac{1}{2}}{L_1'}, \quad (390)$$

$$F_{w1}' = 0,4 \pi \frac{1}{2} AW_w, \quad (391)$$

$$\Phi_{w1} = 0,4 \pi \frac{AW_w}{2} \frac{a_1' (l_w + b_w + l_p)}{2L_1'} \quad (392)$$

Если полюсные башмаки значительно выступают из-под сердечников, то необходимо учесть еще поток  $\Phi_{w1}''$ , который выходит из обращенной вверх поверхности выступающей части. Для этого потока имеем.

$$\Phi_{w1}'' = 0,4 \pi \frac{AW_w}{2} \frac{a_1'' (l_w - l_{wm})}{L_1''}. \quad (393)$$

Следовательно,

$$\Phi_{w1} = 0,4 \pi \frac{AW_w}{2} \left[ \frac{a_1' (l_w + b_w + l_p)}{2L_1'} + \frac{a_1'' (l_w - l_{wm})}{L_1''} \right], \quad (392a)$$

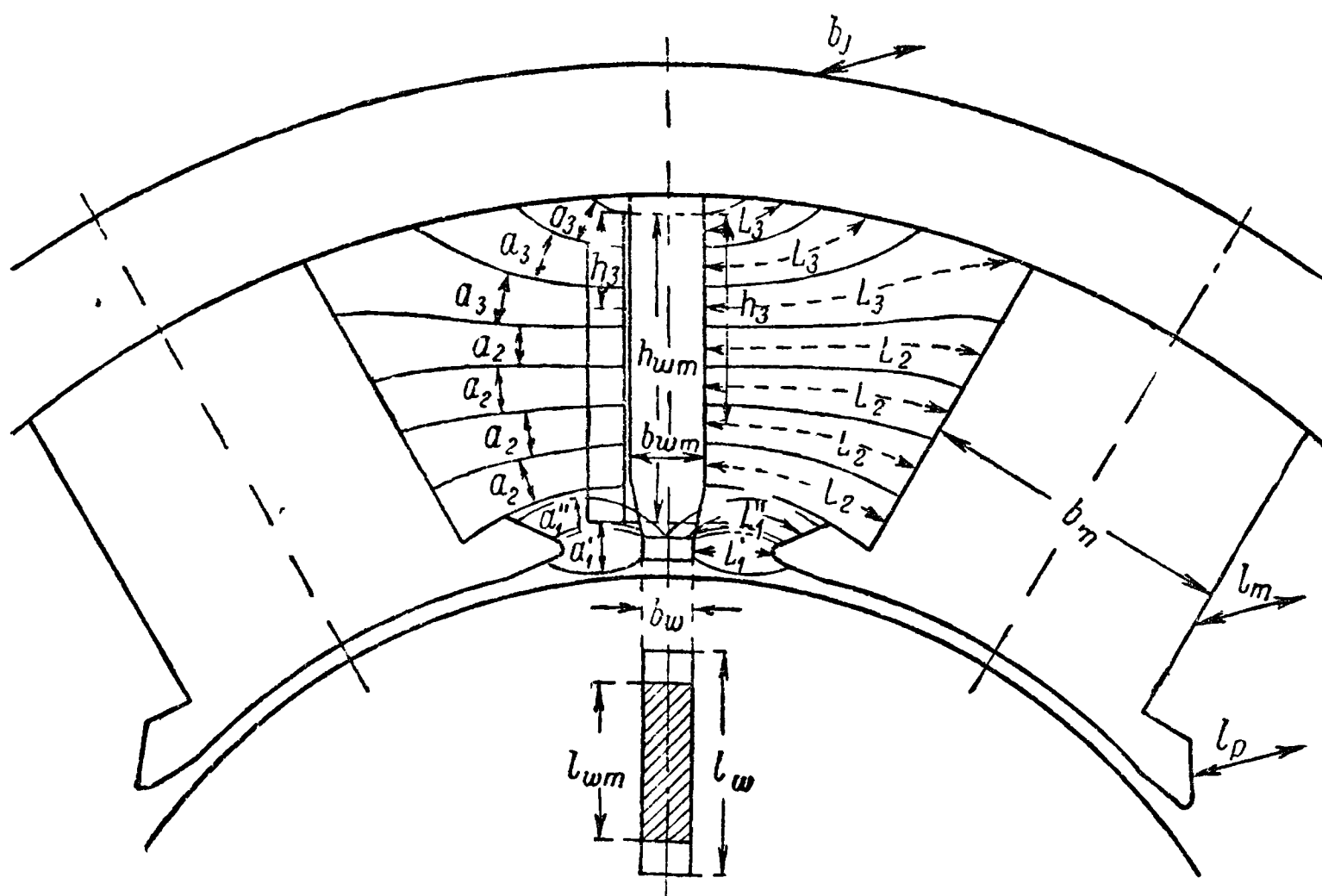
или

$$\Phi_{w1} = 0,4 \pi \frac{AW_w}{2} \lambda_{w1}, \quad (394)$$

где

$$\lambda_{w1} = \frac{a_1' (l_w + b_w + l_p)}{2L_1'} + \frac{a_1'' (l_w - l_{wm})}{L_1''}. \quad (394a)$$

2) Поток  $\Phi_{w2}$  между сердечником и основным полюсом. Для подсчета этого потока разбиваем его, как показано на фиг. 222, на отдельные трубки. При этом принимаем, что те магнитные линии, для которых  $L_2 > L_3$ , замыкаются через ярмо.



Фиг. 222. Картина внутренних потоков рассеяния добавочных полюсов

Для отдельной трубки имеем (фиг 222)

$$d\lambda_{w2} = \frac{a_2 (l_{wm} + b_{wm} + l_m)}{2L_2}, \quad F_{w2} = \frac{1}{2} 0,4 \pi AW_w \frac{h_2}{h_{wm}},$$

$$d\Phi_{w2} = \frac{1}{2} 0,4 \pi AW_w \frac{a_2 (l_{wm} + b_{wm} + l_m) h_2}{2L_2 h_{wm}}.$$

Весь поток

$$\Phi_{w2} = 0,4 \pi \frac{AW_w}{2} \frac{l_{wm} + b_{wm} + l_m}{2h_{wm}} \sum \frac{h_2 a_2}{L_2}, \quad (395)$$

или

$$\Phi_{w2} = 0,4 \pi \frac{AW_w}{2} \lambda_{w2} \quad (396)$$

Здесь

$$\lambda_{w2} = \frac{wm}{2h_{wm}} \frac{wm + l_m}{L} \sum \frac{h_2 a_2}{L}. \quad (396a)$$

В многополюсной машине можно принять, что внутренние поверхности сердечников добавочного и основного полюсов параллельны друг другу, и приравнять поток  $\Phi_{w3}$  нулю.

Тогда м. д. с. для потока  $\Phi_{w2}$  будет равна:

$$F_{w2} = \frac{1}{2} 0,4 \pi AW_w \frac{\frac{1}{2} h_{wm}}{h_{wm}} = \frac{1}{4} 0,4 \pi AW_w.$$

Кроме того, имеем:

$$a_2 = h_{wm}, \quad L_2 = \frac{1}{2} \left( \frac{\tau_1 + \tau_2}{2} - b_m - b_{wm} \right) = \frac{\tau_1 + \tau_2 - 2b_m - 2b_{wm}}{4};$$

поэтому для многополюсных машин

$$\Phi_{w2} = 0,4 \pi \frac{AW_w}{4} \frac{h_{wm} (l_{wm} + b_{wm} + l_m) \frac{1}{2}}{\frac{1}{4} (\tau_1 + \tau_2 - 2b_m - 2b_{wm})} = 0,4 \pi \frac{AW_w}{2} \lambda_{w2}. \quad (397)$$

Здесь

$$\lambda_{w2} = \frac{h_{wm} (l_{wm} + b_{wm} + l_m)}{\tau_1 + \tau_2 - 2b_m - 2b_{wm}}. \quad (397a)$$

3) Поток  $\Phi_{w3}$  между сердечником добавочного полюса и ярмом. Для любого из трубок этого потока имеем:

$$F_{w3} = \frac{1}{2} 0,4 \pi AW_w \frac{h_3}{h_{wm}}; \quad d\lambda_{w3} = \frac{a_3 (l_{wm} + b_{wm} + b_j)}{2L_3};$$

$$d\Phi_{w3} = \frac{1}{2} 0,4 \pi AW_w \frac{h_3}{h_{wm}} \frac{a_3 (l_{wm} + b_{wm} + b_j)}{2L_3}.$$

Следовательно,

$$\Phi_{w3} = \frac{1}{2} 0,4 \pi AW_w \frac{l_{wm} + b_{wm} + b_j}{2h_{wm}} \sum \frac{h_3 a_3}{L_3} = 0,4 \pi \frac{AW_w}{2} \lambda_{w3}. \quad (398)$$

Здесь

$$\lambda_{w3} = \frac{l_{wm} + b_{wm} + b_j}{2h_{wm}} \sum \frac{h_3 a_3}{L_3}. \quad (398a)$$

4) Общий поток рассеяния  $\Phi_{ws}$ :

$$\Phi_{ws} = 2 (\Phi_{w1} + \Phi_{w2} + \Phi_{w3}) = 0,4 \pi AW_w \sum \lambda_w = 0,4 \pi AW_w \Lambda_{ws}, \quad (399)$$

здесь

$$\Lambda_{ws} = \lambda_{w1} + \lambda_{w2} + \lambda_{w3}. \quad (399a)$$

Складывая  $\Phi_{ws}$  с потоком  $\Phi_w$ , получим полный поток, входящий из ярма в сердечник добавочного полюса:

$$\Phi_{wm} = \Phi_w + \Phi_{ws} = \Phi_w \left( 1 + \frac{\Phi_{ws}}{\Phi_w} \right) = \sigma_w \Phi_w, \quad (400)$$

где

$$\sigma_w = 1 + \frac{\Phi_{ws}}{\Phi_w}. \quad (400a)$$



Подставляя (399), окончательно получим:

$$\sigma_w = 1 + \frac{0,4 \pi A W_w}{\Phi_w} A_{ws}. \quad (400в)$$

Рассеяние добавочных полюсов желательно делать возможно меньше. Для этого надлежит помещать обмотку добавочных полюсов возможно ближе к якорю. При этом получается, кроме того, выигрыш в расходе меди на обмотку добавочных полюсов.

Ради уменьшения рассеяния добавочных полюсов и получения для их обмотки достаточного места, полюсную дугу основных полюсов, т. е. коэффициент ее  $\alpha_s$ , делают в машинах с добавочными полюсами меньше, чем в машинах без добавочных полюсов (67).

### 159. Кривая намагничивания добавочных полюсов

Кривая намагничивания добавочных полюсов представляет собою зависимость потока, выходящего из добавочных полюсов в якорь, от ампервитков, создаваемых катушками добавочных полюсов (или от тока нагрузки). При правильно рассчитанных добавочных полюсах кривая намагничивания идет в пределах номинальной нагрузки по прямой линии, на фиг. 223, а — по прямой  $\overline{OA}$ . Начиная с некоторого значения тока нагрузки, получаем постепенное отклонение от прямой, причем в дальнейшем кривая загибается и пересекает в некоторой точке  $x$  ось абсцисс

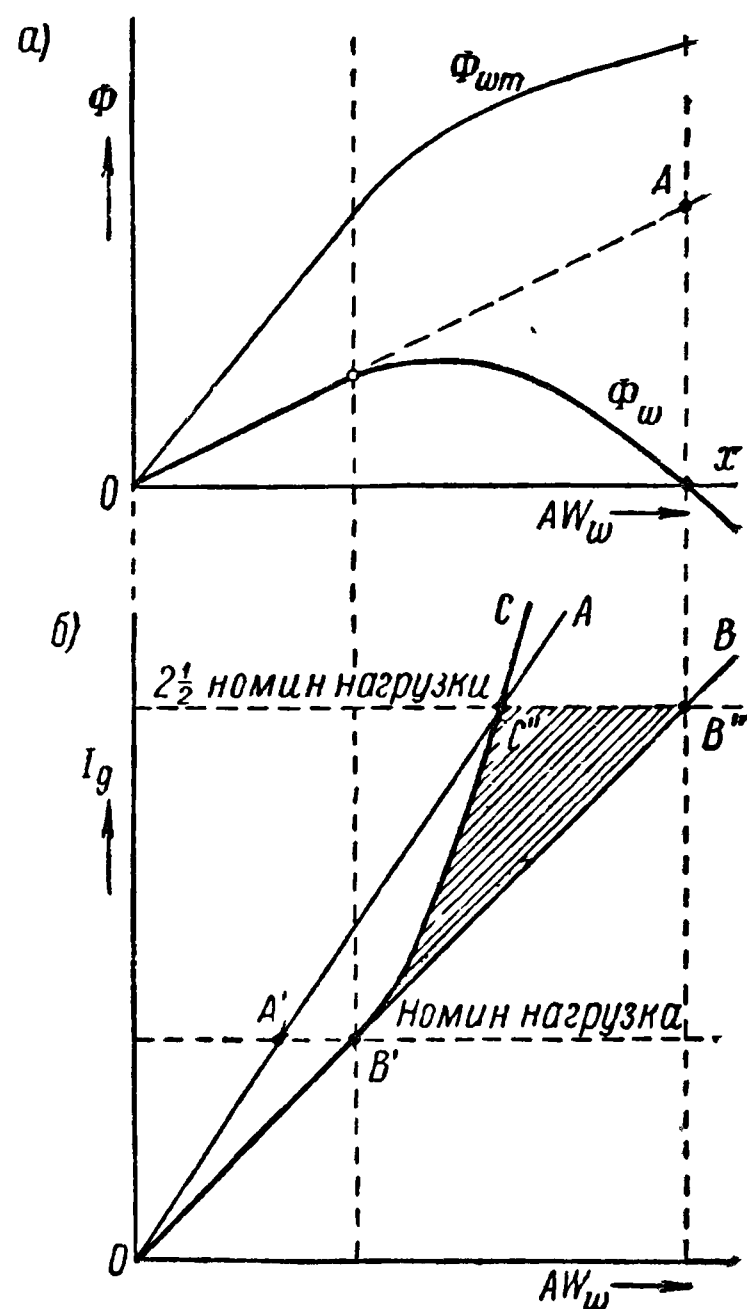
Для выяснения причин указанного загиба кривой намагничивания рассмотрим фиг. 223, б. Здесь линия  $OB$  представляет собой зависимость ампервитков добавочных полюсов  $AW_w$  от тока нагрузки. Линия  $\overline{OA}$  дает в функции от тока нагрузки ампервитки  $AW_{wq}$ , необходимые для компенсации реакции якоря, причем на фиг. 223, б принято, что

$$AW_w = 1,5 AW_{wq}.$$

Горизонтальные отрезки между прямой  $\overline{OB}$  и кривой  $OC$  показывают ампервитки  $AW_{w\Sigma}$ , необходимые для проведения полезного потока добавочных полюсов ( $\Phi_w$ ) и потока рассеяния ( $\Phi_{ws}$ ) через железо добавочных полюсов. При номинальной нагрузке машины в случае, приведенном на фиг. 223, б,  $AW_{w\Sigma} = 0$ , вследствие этого избыток ампервитков добавочных полюсов над ампервитками якоря, отрезок  $A'B'$  идет целиком на проведение потока  $\Phi_w$  в якорь. При нагрузке, равной 2,5 номинальной, ампервитки  $AW_{w\Sigma} = C''B''$ , т. е. избытку ампервитков добавочных полюсов над ампервитками якоря, вследствие чего поток  $\Phi_w$  обращается при этой нагрузке в нуль.

При скупо рассчитанных сердечниках добавочных полюсов подобное явление может произойти уже при двойной перегрузке. Добавочные полюсы тогда не только не улучшают коммутации, но, наоборот, начинают вредить ей, так как наличие их способствует увеличению вредного поля в зоне коммутации.

Ввиду этого сердечники добавочных полюсов машин, предназначенных для работы с большими кратковременными перегрузками, надлежит рассчитывать с соответствующим запасом.



Фиг. 223. Кривая намагничивания добавочных полюсов.

## Е. ПРИЧИНЫ КОММУТАЦИОННОГО ИСКРЕНИЯ, ЯВЛЕНИЕ КРУГОВОГО ОГНЯ И СВОЙСТВА ЩЕТОК

### 160. О классической теории коммутации и причинах коммутационного искрения

Теория коммутации машин постоянного тока подверглась особенно сильной разработке в последние годы прошлого столетия и в начале этого столетия, до первой мировой войны 1914—1918 гг. В конце прошлого столетия, в связи со все возрастающей мощностью машин постоянного тока и необходимостью практического разрешения вопросов коммутации, появились три работы: Жиро, Фишер-Гиннена и Арнольда и Ми [Л. 21—23], в которых вопросы коммутации были рассмотрены независимо одинаковым образом и привели к одинаковым результатам. Эта теория получила название классической или теории Арнольда — автора, более других авторов поработавшего над ее развитием.

Сущность теории заключается в том, что, исходя из общего уравнения коммутации (297) и предполагая вышеуказанные условия изменения сопротивления контакта щеток, разлагают ток и внешнюю э. д. с. коммутируемой секции на две составляющие: прямолинейную и добавочную. Первая, рассмотренная нами выше, дает прямолинейное изменение коммутационного тока, а потому вопрос сводится к тому, как будет изменяться остающаяся часть тока и напряжения

Анализ этой проблемы (его опускаем) приводит к выводу, что постоянная

$$A = \frac{R_B T}{L_s} \text{ должна быть } > 1, \quad (401)$$

откуда

$$\frac{L_s}{T} < R_B,$$

или умножая на  $2l_a$

$$2l_a \frac{L_s}{T} < R_B 2l_a. \quad (402)$$

Правая часть этого неравенства представляет падение напряжения под всей щеткой:

$$\bar{\varepsilon}_B = 2l_a R_B, \quad (403)$$

а левая будет, очевидно, равна э. д. с. самоиндукции

$$\bar{e}_s = 2l_a \frac{L_s}{T} \quad (404)$$

Таким образом, получаем:

$$\bar{e}_s < \bar{\varepsilon}_B, \quad (405)$$

т. е. среднее значение э. д. с. самоиндукции всей короткозамкнутой секции должно быть меньше среднего значения падения напряжения под щеткой, соответствующего прямолинейной коммутации.

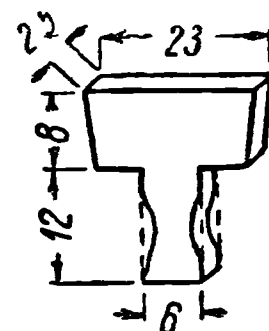
Если условие (405) не будет выполняться, то плотность тока при размыкании короткозамкнутой секции будет стремиться к бесконечности. Этим и объяснялось искрение под щеткой.

Следует отметить, что индуктивность  $L_s$  в течение периода коммутации претерпевает изменения, точно так же и удельное сопротивление щетки  $R_B$

оказывается величиной переменной. Из хода рассуждений вытекает, однако, что в выражение для  $A$  должны быть подставлены те значения  $L_s$  и  $R_B$ , которые соответствуют моменту окончания коммутации  $t = T$ ; обозначая их через  $R_{BT}$  и  $L_T$ , имеем:

$$A = \frac{R_{BT} T}{L_T} > 1. \quad (406)$$

Столь определенные и ясные выводы теории коммутации побудили ряд исследователей поставить опыты по их проверке. Проверка дала отрицательные результаты. Оказалось, что ряд машин постоянного тока работает без искрения, хотя условие (405) в них далеко не выполнено. Тогда были сделаны попытки оправдать условие (405). Арнольд произвел следующий классический опыт. От угольной щетки был отпилен кусок, показанный на фиг. 224 (размеры в мм) и наложен на скользящее кольцо; скорость на окружности была 5,5 м/сек. После того как поверхность контакта щетки хорошо пришлифовалась, через уголь стали пропускать ток, все время увеличивая его значение. Когда ток достиг плотности 465 а/см<sup>2</sup>, уголь начал в тонкой части накаливаться, широкая же часть, прилегающая к кольцу, вследствие хорошего отвода тепла оставалась темной. При плотности тока в 500 а/см<sup>2</sup> тонкая часть угля накалилась добела и через несколько секунд выгорела до формы, показанной на фиг. 224. Рабочая часть щетки осталась попрежнему темной, причем никакого искрения не наблюдалось. Опыт ясно показывает, что искрение щетки не может быть вызвано одной лишь чрезмерной плотностью тока.



Фиг. 224  
Угольная щетка в опытах Арнольда (размеры в миллиметрах).

Тогда причине искрения щеток было дано другое объяснение, а именно, что для появления кратковременной дуги, возникающей в виде искры, требуется не только чрезмерная плотность тока, но и определенная минимальная э. д. с., которая должна индуцироваться изменением тока, или, как выразился Рейд, возникновение искры обуславливается достижением известной «плотности энергии». Но как при первоначальном объяснении, так и при позднейшем, чрезмерная плотность является, очевидно, обстоятельством, способствующим искрению, а потому ее следует избегать.

Позже (1924 г.) Рихтер показал, что если сбегаящий край щетки не параллелен пластине коллектора, то реактивная э. д. с. всегда будет равна нулю, каково бы ни было значение  $\frac{R_B T}{L_s}$  [Л. 24]. Из этого вытекает, сколько велико влияние, оказываемое на реактивную э. д. с. состоянием поверхности щеток, и что неизбежные небольшие неправильности в контакте между щеткой и уходящей из-под нее коллекторной пластиной имеют положительное влияние на процесс коммутации. Это доказательство может, таким образом, служить примирением противоречия между теоретическим выводом, требующим, чтобы было  $A > 1$ , и данными опыта о многих машинах постоянного тока, успешно работающих без искрения, для которых подсчет дает  $A < 1$ .

Однако против условия  $A > 1$  имеется еще одно неустранимое принципиальное возражение, вытекающее из ниже рассмотренных свойств угольных щеток. Условие  $A > 1$  было получено Арнольдом математическим путем из уравнения коммутации при помощи разложения коммутационного тока на две составляющие ( $i = i_g + i_z$ ), где  $i_g$  — ток, который соответствует прямой коммутации, а  $i_z$  — добавочный ток короткого замыкания. Несомненно, такое разложение является весьма полезным, но применение его при математическом анализе процесса было бы законным лишь в том случае, если бы переходное сопротивление контакта щеток оставалось неизменным. В действительности, как увидим (§ 162), переходное сопротивление контакта щеток

меняется почти в обратной пропорциональной зависимости от тока. При этих условиях разложение тока на две составляющие столь же незаконно, как разложение магнитного потока в магнитной цепи, проницаемость которой зависит от индукции. Разница в этих двух явлениях лишь в том, что сопротивление переходного контакта щеток с увеличением тока падает, а магнитное сопротивление с возрастанием потока возрастает.

Таким образом, условию  $A > 1$  нельзя приписывать того абсолютного значения, какое вытекает из теории, построенной на неизменности переходного сопротивления щеток. И мы можем лишь сказать, что опасность искрообразования будет тем меньше, чем больше будет отношение  $R_B/L_s$  и чем больше будет период коммутации, при прочих равных условиях искрообразования под щетками.

#### 161. Явление кругового огня и средства для его предотвращения

Выше (гл. V, § 131) было указано на вероятность возникновения кругового огня на коллекторе машины постоянного тока при большом значении напряжения между соседними пластинами коллектора. Мы рассмотрим здесь это явление подробно. Из сказанного ранее видно, что искрение потенциального порядка как будто совершенно не связано с коммутационным искрением. Стоит только, казалось бы, предусмотреть при расчете машины  $E_{dmb}$  меньше указанных выше допустимых значений, чтобы быть гарантированными от кругового огня. Как показывает, однако, опыт эксплуатации крупных электрических машин, дело обстоит далеко не так просто. Имеется теснейшая связь между искрением потенциального порядка и искрением коммутационным. Машина, благополучная по допущенному в ней значению  $E_{dmb}$ , может дать круговой огонь в случае резкого нарушения коммутации тока. Коммутационное искрение может развиться и перейти в круговой огонь.

Особенно тяжело складываются условия в случае резких толчков нагрузки и короткого замыкания машины как предельного возможного толчка тока. Добавочные полюсы могут оказывать при этом даже вредное влияние на коммутацию машины, так как при токах, значительно превышающих номинальный, получается насыщение сердечников этих полюсов и лишь весьма небольшое возрастание потока, индуктирующего электродвижущую силу  $e_w$ . В то же время башмак и сердечник полюса, будучи выполнены из железа, увеличивают проводимость для поля якоря в зоне коммутации, по сравнению с таковой же машины без добавочных полюсов, чем способствуют усилению вредного влияния этого поля. Быстрому нарастанию потока добавочных полюсов препятствуют также паразитные токи, появляющиеся в сплошной массе добавочного полюса при быстром изменении тока.

Баланс электродвижущих сил в коммутируемом контуре резко нарушается, появляется некомпенсированная разность э. д. с., причем коммутация замедляется, так как преобладает реактивная э. д. с.  $e_R$ .

На коллекторе возникает искрение, имеющее своим очагом сбегаящий край щетки, раскаленный благодаря повышенной плотности тока (место раскаливания — см. фиг. 225, а). Между щеткой и покидающей ее пластиной возникает электрическая дуга (фиг. 225, б), которая растягивается механически благодаря движению коллектора (фиг. 225, в). Через дугу проходит при этом значительный ток, складывающийся из тока короткого замыкания секций, перекрытых дополнительно дугой, а также из тока, отдаваемого во внешний контур через дугу.

Благодаря значительному току в дуге появляются электродинамические усилия, стремящиеся ее растянуть, благодаря чему электрическая дуга приобретает форму фиг. 225, г, что, в свою очередь, ведет к весьма быстрому перемещению катодного пятна, увлекаемого разрастающейся дугой. Скорость перемещения пятна может быть при этом значительно большей, чем скорость



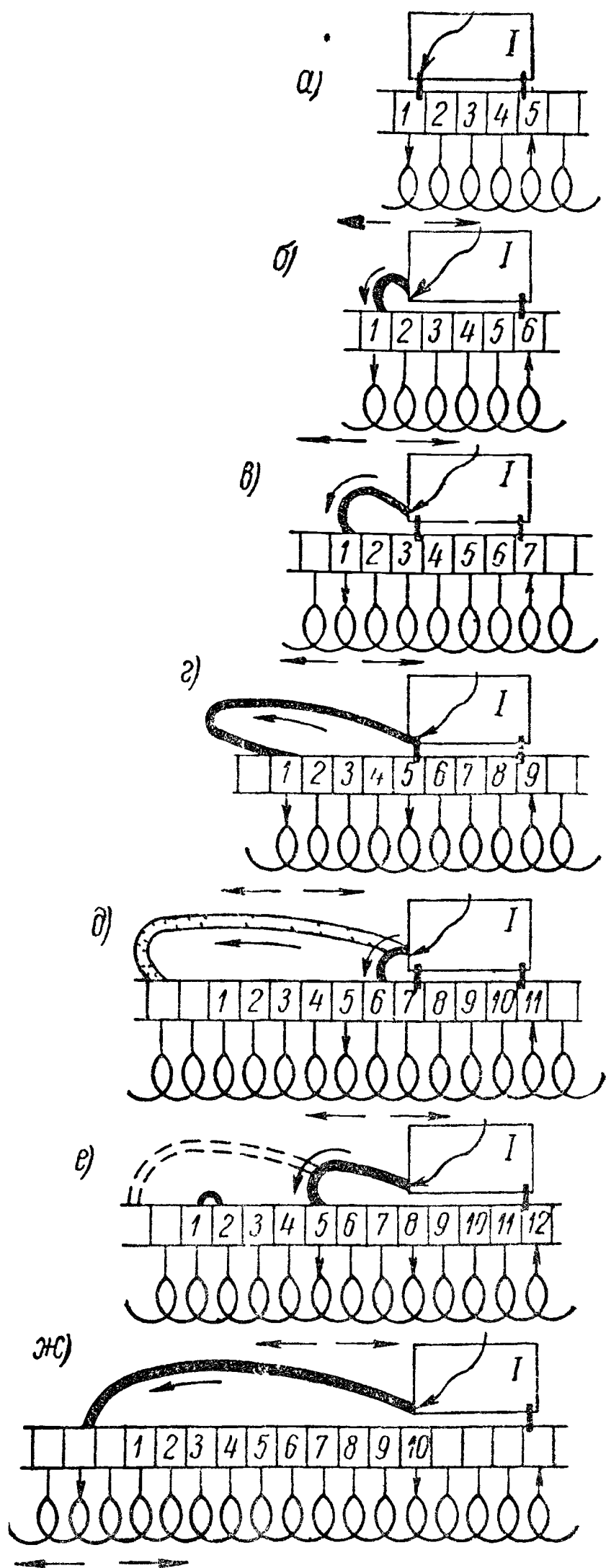
на окружности коллектора. Ввиду значительной длины растянувшейся дуги падение напряжения в ней возрастает, что обуславливает нарастание потенциала щетки по отношению к коллектору. Возникает вторая дуга между щеткой и коллектором (фиг. 225, *д*), шунтирующая первую. Разность потенциалов, обуславливающая существование первой дуги, падает; растянувшаяся дуга обрывается. Начинает растягиваться новая дуга (фиг. 225, *е*); эта последняя растянется, однако, на большее расстояние, так как окружающее коллектор пространство ионизировано предыдущей дугой, а процесс рекомбинации ионов может не закончиться к моменту прохождения последующей дугой пространства, занятого ранее предыдущей (фиг. 225, *ж*). Процесс обрыва и восстановления дуги продолжается много раз, причем в случае глухого короткого замыкания, сопровождаемого большим током, и недостаточной скорости отключения машины дуга продолжает гореть, разрушая коллектор и щетки, до момента снятия с машины возбуждения и гашения ее поля.

Интенсивному образованию электрических дуг на коллекторе при коротком замыкании машины постоянного тока способствует также то обстоятельство, что под влиянием поля реакции якоря получается опрокидывание поля под набегающим краем полюсного башмака, вследствие чего разность потенциалов между вышедшими из-под щетки пластинами имеет направление, способствующее поддержанию дуги между коллектором и щеткой.

На фиг. 226 дана картина распределения магнитного потока в генераторе постоянного тока при коротком замыкании. Как видно, в проводниках, лежащих под набегающими краями полюсов, индуктируется э. д. с. полярности, обратной той, которая обусловлена основным полюсом. При этом левая щетка (отрицательная) приобретает более высокий потенциал, чем только что вышедшие из-под нее коллекторные пластины. Возникают коммутационные дуги, которые оказываются одного направления с теми дугами, которые обусловлены разностью потенциалов между коллекторными пластинами. Это способствует интенсивному искрению.

Что касается изменения потенциала пластин, уходящих из-под щетки, то на фиг. 227 даны снятые В. В. Фетисовым потенциальные кривые на коллекторе генератора постоянного тока. Кривые показывают, как нарастает потенциал пластин в случае холостого хода генератора (кривые 1 и 2) и при коротком замыкании как некомпенсированного генератора (кривые 3 и 4), так и компенсированного (кривые 5 и 6).

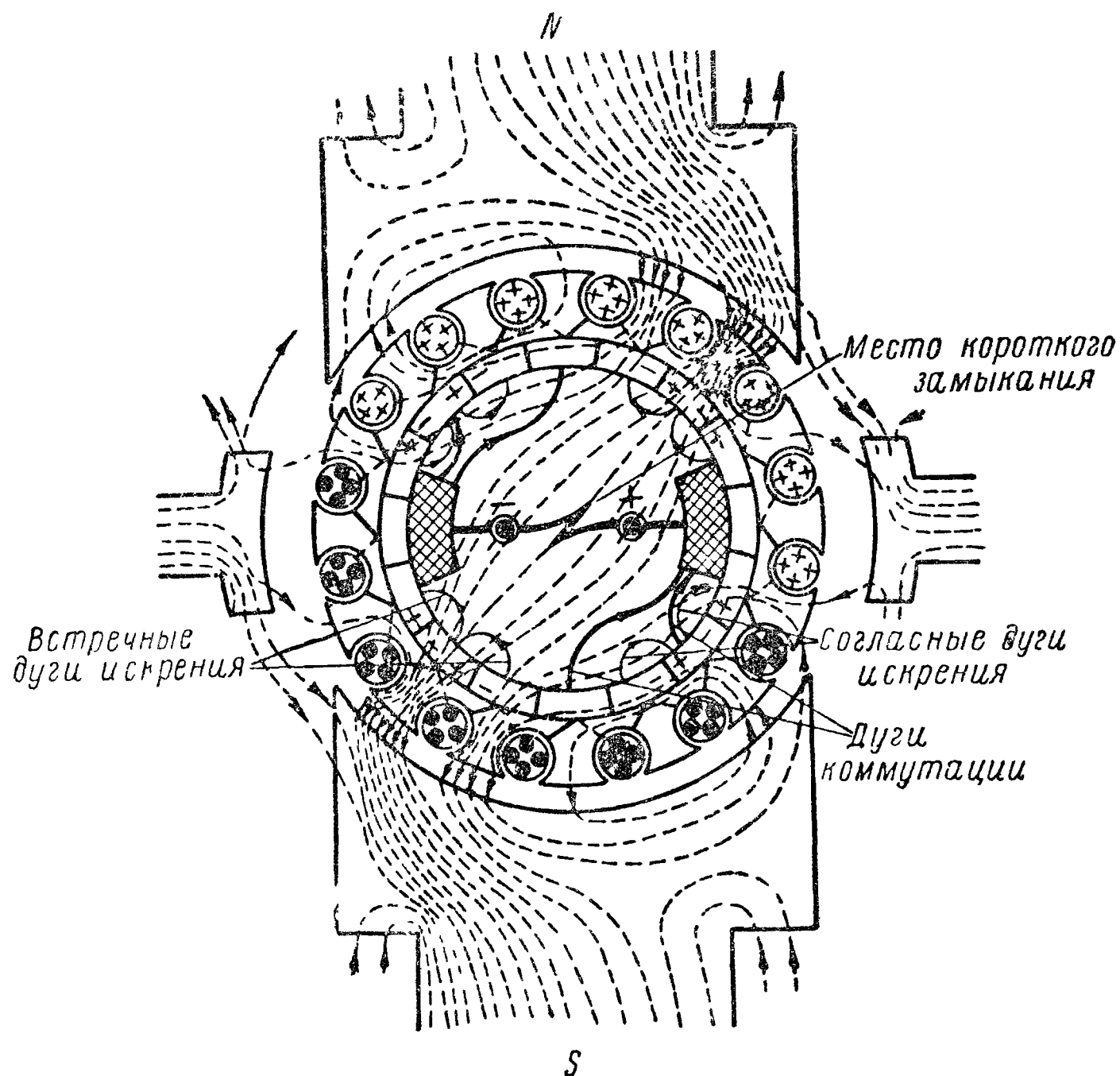
Обращает на себя внимание то обстоятельство, что при коротком замыкании некомпенсированного генератора потенциал пластин сперва нарастает,



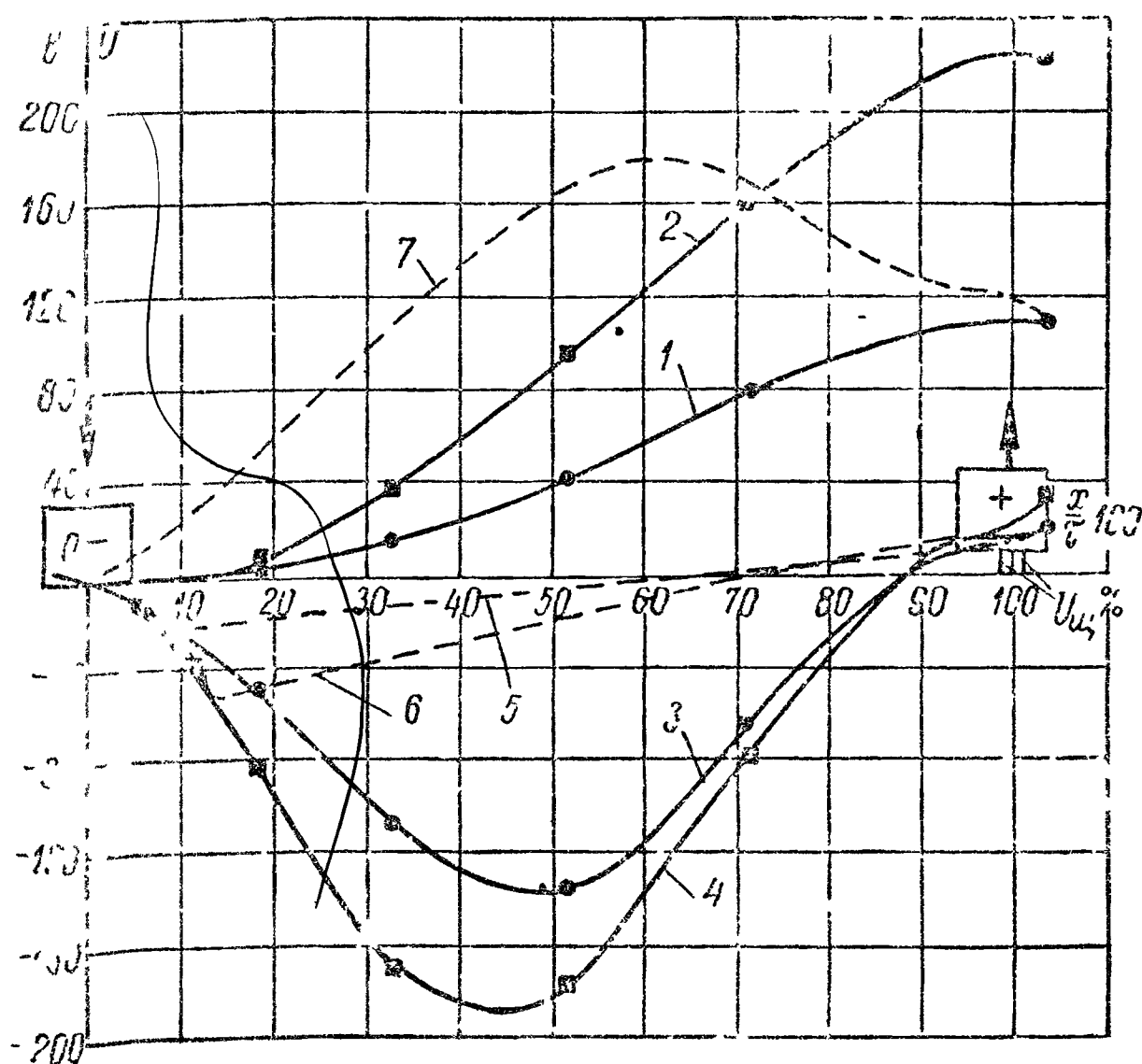
Фиг. 225 Картина, иллюстрирующая образование электрических дуг на коллекторе при коротком замыкании



а затем падает. При таком его распределении очевидно, что электрическая дуга не может достигнуть щетки противоположной полярности и искрение ограничивается определенной зоной коллектора



Фиг. 226 Карта магнитного поля генератора при коротком замыкании.



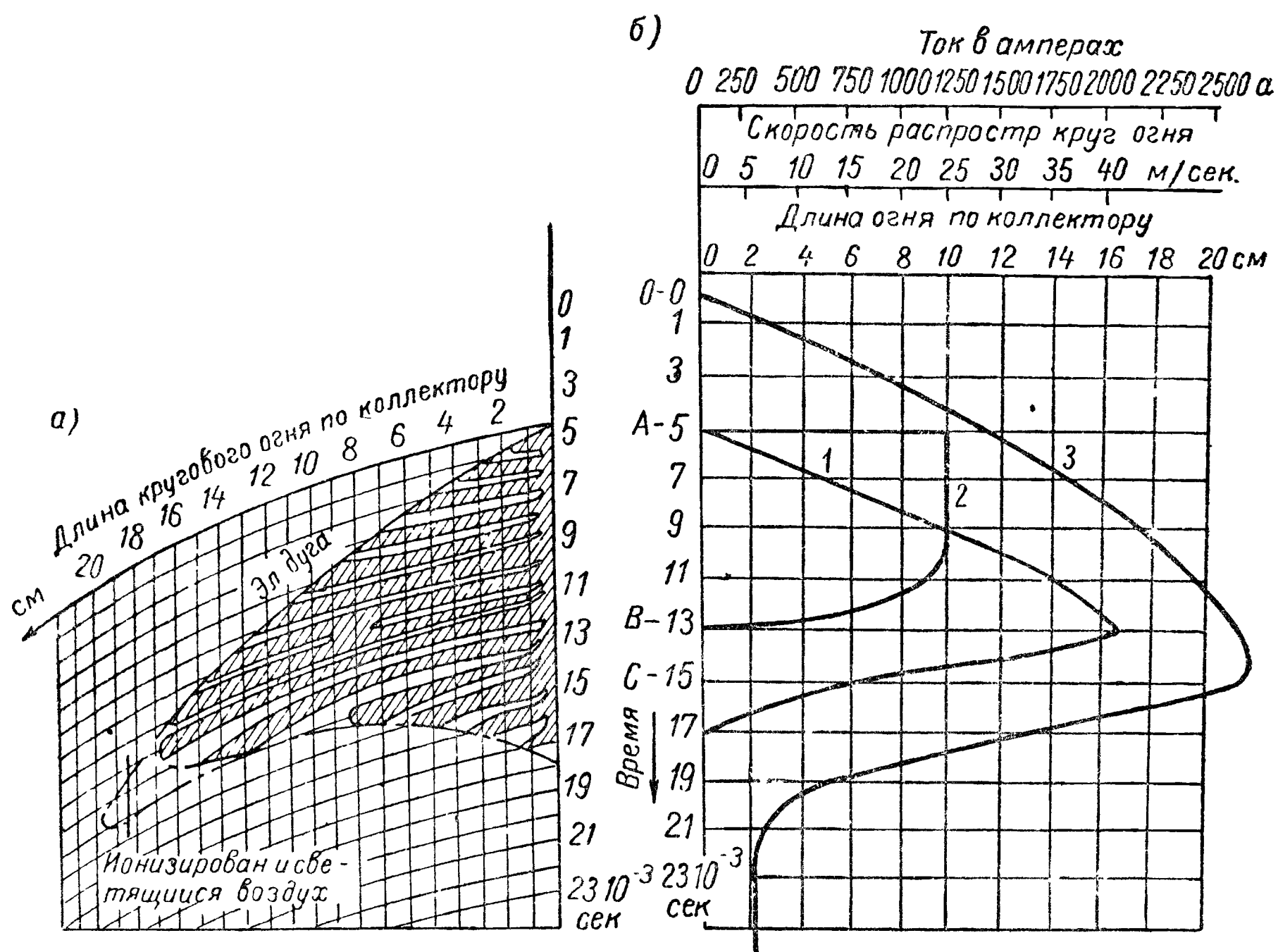
Фиг. 227. Потенциальные кривые коллектора при холостом ходе и коротком замыкании.

Скорость распространения кругового огня на коллекторе не есть фиксированная величина. Электрические дуги при коротком замыкании машины, как это было уже изложено, возникали периодически, причем каждая из этих дуг двигалась со скоростью, значительно (до 10 раз) превышающей скорость

на окружности коллектора. Среднюю скорость распространения кругового огня  $O\ B$  Брон определил как частное от деления наибольшей длины дуги  $s_m$  на время  $t_m$ , протекшее от момента возникновения огня до момента достижения им наибольшей длины:

$$V_m = \frac{s_m}{t_m}.$$

Эта скорость менялась, в зависимости от напряжения перед моментом короткого замыкания, в пределах от 6,8 м/сек до 23 м/сек, тогда как окружная скорость на коллекторе была 24 9 м/сек



Фиг 228 Кривые  $O\ B$ . Брона, характеризующие скорость распространения кругового огня на коллекторе

1 — длина дуги, 2 — скорость дуги, 3 — ток.

Весьма интересны полученные  $O\ B$ . Броном кривые (фиг 228), иллюстрирующие высказанные выше положения

Левая диаграмма (фиг 228, а) дает зависимость пути, пройденного дугой на коллекторе, в функции времени. Диаграмма построена на основании фотографии кругового огня, полученной помощью фотоаппарата, снабженного объективом, смещающимся вверх. Смещение это происходит в течение времени, немного большего, чем время всего явления возникновения и исчезновения затем огня на коллекторе вслед за выключением машины

На фиг. 228, а выделены отдельные вероятные дуги, насколько это представилось возможным сделать на основании фото Фиг. 228, б дает кривые, иллюстрирующие: 1 — зависимость пути, пройденного огнем по коллектору, от времени, 2 — зависимость скорости движения огня по коллектору от времени, 3 — зависимость тока в главной цепи машины от времени

Вопрос установления физики процесса образования кругового огня является весьма существенным, так как он позволяет надежно оценить те методы,

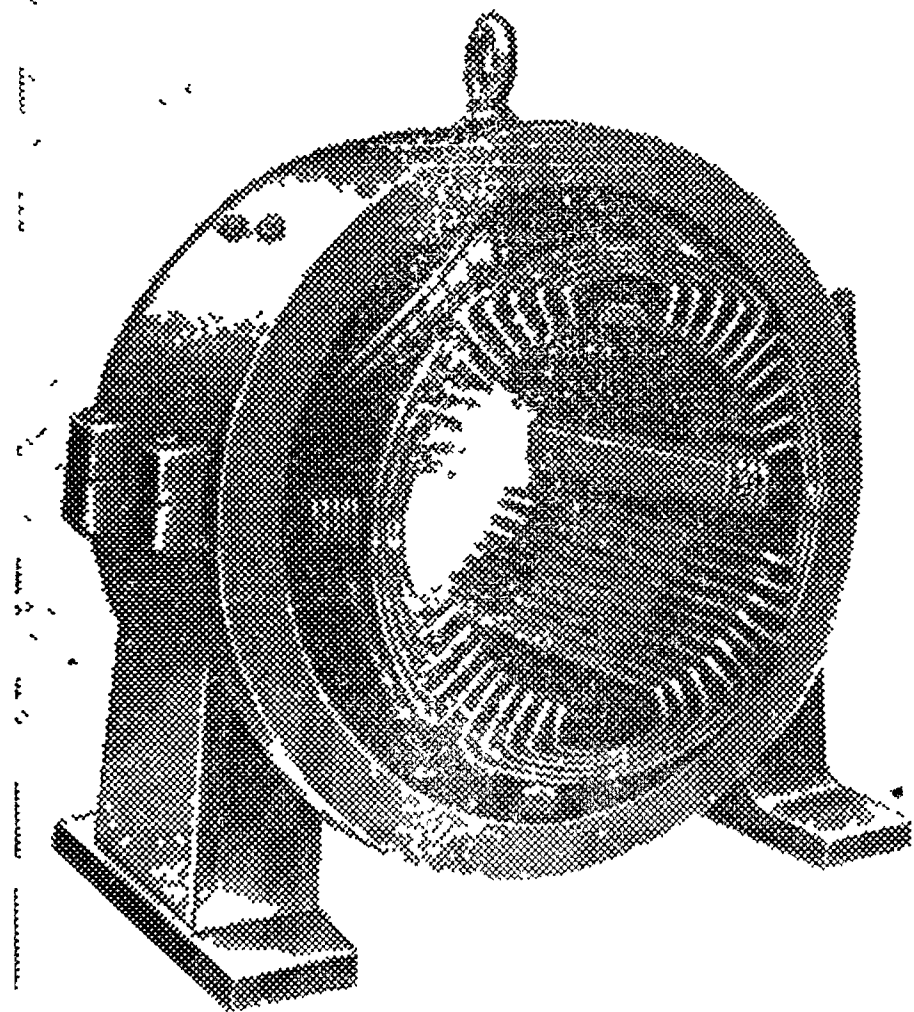
которые применяют в настоящее время с целью борьбы с возникновением кругового огня.

Наиболее действительным методом борьбы являются быстро действующие выключатели, размыкающие цепь машины в течение весьма короткого промежутка времени, порядка 0,06—0,01 сек.

Поскольку, однако, нет все же никакой гарантии, что скорость распространения огня на коллекторе при всех возможных условиях его возникновения не превзойдет скорости на окружности коллектора, то желательно задержать распространение дуги и сопровождающих ее ионизированных газов. Перегородки, имеющие достаточную высоту и расположенные поперек коллектора значительно способствуют такой задержке. Эти перегородки, отнимая в то же время от дуги тепло, деионизируют ее. Кроме того, необходимо ставить изоляционные щиты, которые препятствовали бы дуге переместиться на торец коллектора.

Сказанное относится ко всем тем случаям, где вероятно возникновение кругового огня, в особенности, к высоковольтным машинам, напряжение которых выше 1000 в.

Средством, значительно уменьшающим возможность возникновения кругового огня, является также компенсационная обмотка, укладываемая во впадины, продельанные в полюсных башмаках. Обмотка эта должна быть так выполнена, чтобы в схеме развертки якорной и компенсационной обмоток одна явилась зеркальным изображением другой. Ввиду наличия промежутков между полюсными башмаками и добавочных полюсов, располагаемых в этих промежутках, полностью осуществить в нормаль-



Фиг. 229. Машина постоянного тока с компенсационной обмоткой.

ных конструкциях идентичность обмоток якоря и компенсационной практически не удается, но все же значительная часть поперечного поля уничтожается встречной м.д.с., включенной последовательно с якорем компенсационной обмотки. На фиг. 229 показана станина машины постоянного тока с такой обмоткой.

Особое значение имеет компенсационная обмотка в турбогенераторах постоянного тока, прокатных двигателях и высоковольтных генераторах. В этих типах машин разность потенциалов между соседними пластинами коллектора находится уже на пределе. В турбогенераторах, вследствие необходимости уменьшить диаметр якоря и коллектора, приходится делать относительно малое число пластин, что ведет к увеличению разности потенциалов между ними. Применяя компенсационную обмотку, можно не бояться, что при нагрузке разность потенциалов, вследствие искажения кривой поля, превзойдет допустимую величину. В прокатных двигателях имеют место значительные кратковременные перегрузки (до 3—4-кратного значения тока по сравнению с номинальным), что при отсутствии компенсации поля якоря легко может привести к возникновению кругового огня. Наконец, высоковольтные машины имеют уже при холостом ходе высокие значения разности потенциалов между пластинами вследствие общей значительной величины напряжения. Поэтому повышать эту разность при нагрузке недопустимо.

## 162. Щетки, применяемые в динамостроении

Щетки, налагаемые на коллектор машины для отвода тока во внешнюю цепь, представляют собой весьма существенное звено в числе других частей машины постоянного тока.

Выше было показано, что процессы, которые имеют место в скользящем контакте между щеткой и коллектором, имеют первенствующее значение при анализе коммутации тока.

Процессы эти в сильнейшей степени зависят от свойств тех щеток, которые применяются для съема тока с коллектора. Применявшиеся первоначально медные щетки, состоявшие из пучка проволок, напоминавшего по внешнему виду метлу или щетку, в настоящее время вовсе не применяются, хотя название щетки сохранилось до настоящего времени. В дальнейшем щетки электрических машин стали выполнять из медной сетки, свернутой в рулон прямоугольного сечения.

С девяностых годов прошлого столетия получили распространение угольные щетки, применяющиеся в настоящее время. Чисто металлических щеток теперь не применяют. Начиная с 1905—1910 гг. изготавливают также металлографитные щетки путем прессовки из смеси порошков меди и графита. Угольные и металлографитные щетки годятся, однако, только для машин, имеющих относительно небольшие скорости на коллекторе.

Для быстроходных машин были разработаны графитные щетки, полученные путем прессовки порошка графита с малым количеством связующего материала (смолы) и последующего обжига при температуре в несколько сот градусов. Некоторые сорта графита допускали возможность выполнения щеток без связующего материала и без обжига. Это так называемые натуральнографитные щетки.

В дальнейшем был получен еще один сорт щеток, а именно электрографитный.

Эти щетки отличаются от угольно-графитных тем, что подвергаются дополнительному прокаливанию при температурах порядка  $2500^{\circ}\text{C}$ . Такая обработка способствует уменьшению жесткости и коэффициента трения щеток о коллектор, что уменьшает вибрации щеток.

Имеем, таким образом, следующие основные классы щеток

1-й класс — металлографитные щетки,

2-й класс — угольно-графитные;

3-й класс — графитные;

4-й класс — электрографитные.

Щетки характеризуются следующими основными свойствами:

- 1) переходным падением напряжения в скользящем контакте между щеткой и коллектором;
- 2) коэффициентом трения щеток о коллектор;
- 3) износом щетки;
- 4) износом коллектора;
- 5) склонностью к искрению вследствие механических причин;
- 6) склонностью к коммутационному искрению.

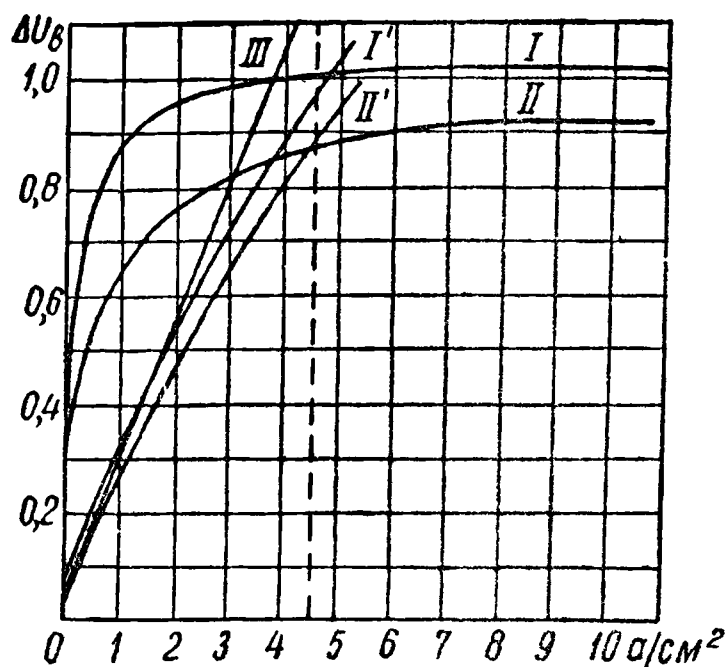
Исключительное значение имеют свойства переходного контакта. Контакт этот обладает той особенностью, что сопротивление его сильно уменьшается при увеличении проходящего через него тока. Кроме того, сопротивление контакта зависит от направления тока и от тепловых условий. Свойства переходного контакта резко изменяются при переходе от неподвижного состояния коллектора или кольца к вращению последнего. Свойства эти мало, однако, зависят от скорости вращения.

На фиг. 230 даны экспериментальные кривые, полученные Арнольдом и Каном [Л. 13]. Имеем здесь зависимость падения напряжения в переходном слое щетка-кольцо. Кривые I и II дают падение напряжения при вращаю-



щемся кольце и разных направлениях тока ( $I$  — направление тока кольцо-щетка,  $II$  — щетка-кольцо). Как видно, при плотностях тока, превышающих  $3-4 \text{ а/см}^2$ , имеем почти постоянное падение напряжения в контакте. При неподвижном кольце падение напряжения становится почти пропорциональным плотности тока (кривая  $III$ ). При быстро изменяющемся токе имеем кривые  $I'$  и  $II'$ , соответственно условиям  $I$  и  $II$ .

Картина протекания тока в переходном слое щетка-кольцо или щетка-коллектор является до сих пор далеко не полностью исследованной. Однако благодаря работам О. Г. Вегнера и М. Ф. Карасева представляется возможным установить основные физические процессы, имеющие место в контакте.



Фиг. 230. Экспериментальные кривые Арнольда и Кана, характеризующие падение напряжения в контакте щетка-кольцо.

Прежде всего приходится отметить, что вследствие пористого строения щетки имеется относительно мало мест непосредственного соприкосновения щетки и коллектора. В этих точках соприкосновения, естественно, имеет место весьма большая плотность тока, что ведет к нагреванию соприкасающихся поверхностей, причем температуры здесь могут достигать таких величин, при которых начинается испускание положительных ионов и электронов. Так, при падении напряжения в переходном слое в 1 в плотности тока в  $8 \text{ а/см}^2$  и толщине переходного слоя в  $0,0001 \text{ см}$  будем иметь объемную плотность энергии:

$$\frac{1,8 \cdot 10^{-3}}{0,0001} = 80 \text{ квт/см}^3.$$

Практически эта плотность будет значительно больше, так как имеется небольшое количество точек непосредственного соприкосновения.

Помимо появления ионов и электронов, благодаря тепловой эмиссии имеет место также эмиссия, обусловленная сильным электрическим полем в тонком контактном слое.

При наличии ионного процесса в контактном слое имеем увеличение падения напряжения в этом слое лишь до такой величины, которая необходима, чтобы создать нужную для поддержания тока эмиссию ионов и электронов.

Все будет обстоит примерно так же, как в газоразрядной электронно-ионной трубке, где падение напряжения между анодом и катодом есть постоянная величина, весьма мало зависящая от силы тока. Это падение обусловлено, в основном, ионизационным потенциалом газа, заполняющего пространство трубки.

Таким образом, следует различать условия прохождения тока через контактную поверхность при малых и больших плотностях тока.

В первом случае наблюдается постоянство контактного сопротивления, во втором постоянство падения напряжения. Переход связан с появлением ионного процесса в контактном слое. При этом различные сорта щеток ведут себя по-разному в части начала ионизации и величины падения напряжения. На фиг. 231 даны характеристики двух щеток. Одна из них ( $I$ ) имеет меньшее контактное падение напряжения, но зато ионизационный процесс в этой щетке наступает раньше; другая имеет большее падение, но ионизация возникает в ней при большей плотности тока.

Наличие постоянства падения напряжения в большом диапазоне плотностей тока способствует лучшим условиям коммутирования, благодаря чему может оказаться, что щетки, которым отвечает кривая  $I$ , будут коммутировать лучше, чем те, которые имеют кривую  $2$ , несмотря на то, что падение напряжения для последних больше.



На фиг. 232 даны средние значения переходного падения напряжения для щеток отечественного производства. При этом фиг. 232, а дает падения напряжения для щеток, не содержащих меди или же с содержанием меди менее 72%, фиг. 232, б — для щеток с содержанием металла более 72%

Что касается коэффициента трения щеток о коллектор, то надо иметь в виду, что с увеличением коэффициента трения растут потери в скользящем контакте согласно выражению (см. далее, гл. X)

$$Q_r = 9,81 p_B S_{\Sigma} \mu_B v_k,$$

где  $Q_r$  — потери на трение в  $вт$ ,

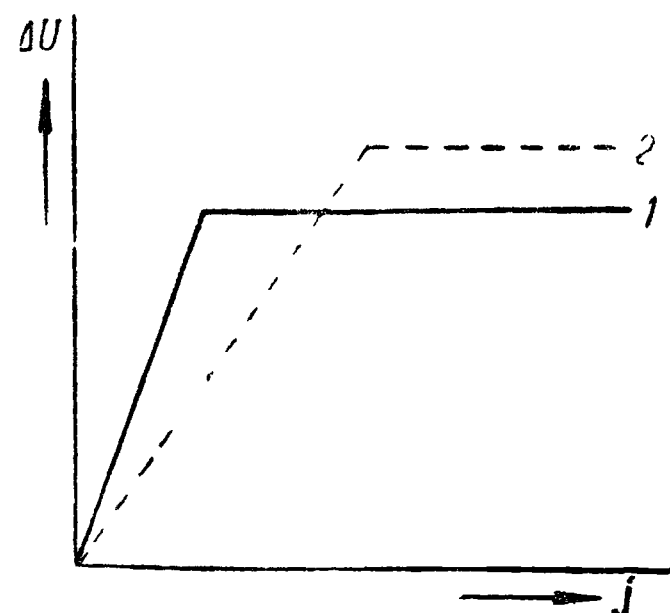
$p_B$  — удельное нажатие щеток в  $кг/см^2$ ,

$S_{\Sigma}$  — общая площадь поперечного сечения щеток в  $см^2$ ;

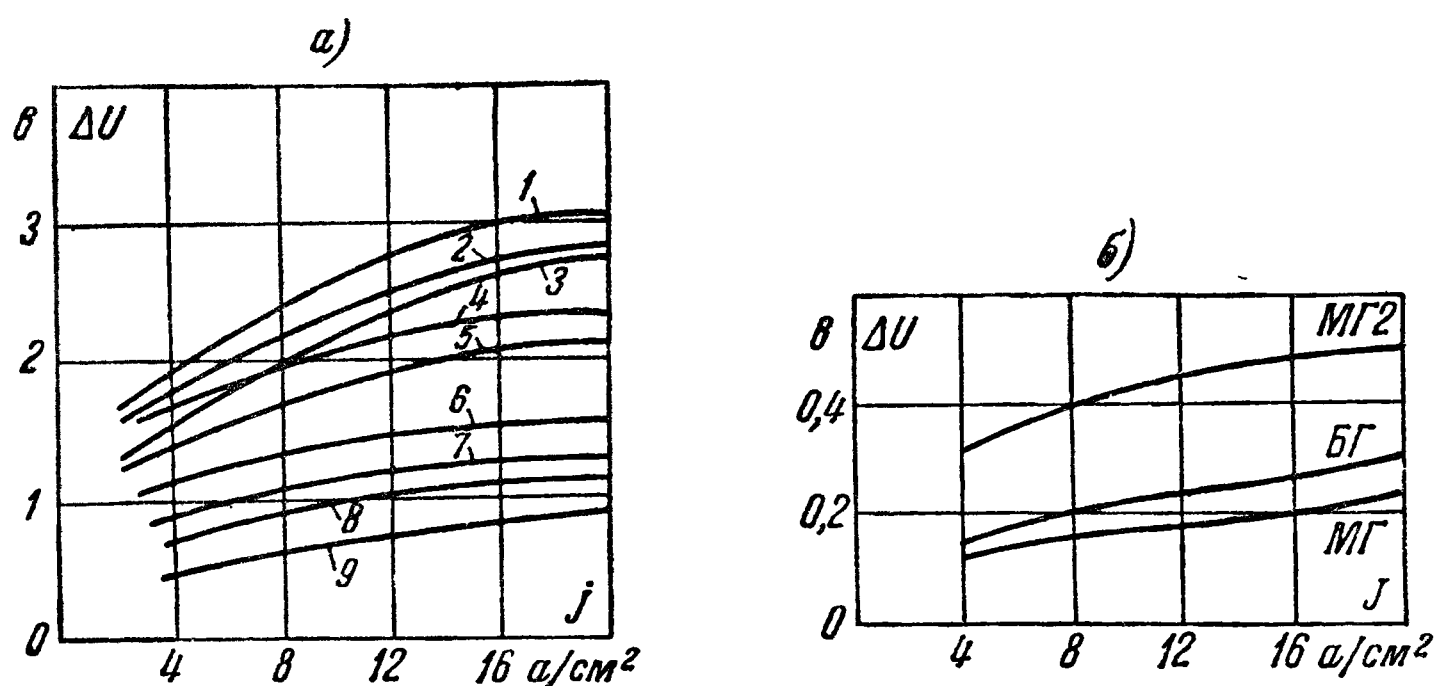
$\mu_B$  — коэффициент трения,

$v_k$  — окружная скорость скользящего контакта в  $м/сек$ .

Ввиду этого для быстроходных машин необходимо применять щетки с низким коэффициентом трения. Точно так же для машин с большим количеством щеток (большое  $S_{\Sigma}$ ) надо стремиться применять щетки с малым коэффициентом трения. Это имеет место обычно в машинах, рассчитанных на низкое напряжение. В этих машинах часто применяют металло-графитные щетки с коэффициентом трения, не превышающим 0,2



Фиг. 231. Характеристики двух щеток.



Фиг. 232. Средние значения переходного падения напряжения для щеток различных марок.

Важен также вопрос об износе щеток и коллектора с течением времени. Стремятся применять щетки мало изнашивающиеся. Эти щетки могут, однако, изнашивать коллектор.

Особо следует отметить электрографитные щетки, которые изнашиваются мало, а также мало изнашивают коллектор.

Что касается склонности щеток к механическому и электрическому искрению, то необходимо иметь в виду, что даже при отсутствии внешних механических дефектов может иметь место вибрация щеток вследствие периодических изменений условий трения. Щетка получает как бы «удар трения», вибрирует и искрит. Наиболее подвержены такому искрению твердые угольные щетки. Вибрации зависят также от окружной скорости коллектора. Для каждой марки щетки существует некоторое предельное значение скорости, при котором щетка начинает искрить вследствие вибраций.

Следует также отметить, что спокойная работа щеток сильно зависит от угла наклона щетки по отношению к коллектору и от давления на щетку.

Искрение электрического порядка зависит прежде всего от течения коммутационного процесса, что было разобрано выше, а также от:

1) давления на щетку; при чрезмерном увеличении давления искрение увеличивается вследствие уменьшения переходного падения напряжения и нагрева щетки и коллектора;

2) плотности тока; при чрезмерной плотности тока возрастает нагрев щеток, что способствует уменьшению переходного падения напряжения и возникновению искрения;

3) наличия оксидной пленки на коллекторе; при исчезновении этой пленки, вследствие истирания ее или малого количества кислорода и влаги в воздухе искрение возрастает.

Технические характеристики основных типов щеток отечественного производства были приведены выше (гл. I, табл. 8).

---

## ГЛАВА VII

### СВОЙСТВА ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

#### 163. Характеристичное уравнение генераторов постоянного тока

Работа генератора постоянного тока характеризуется следующими величинами: 1) напряжением  $U$  на зажимах якоря; 2) током  $I_a$  в обмотке якоря, 3) током  $i_n$  в обмотке возбуждения, 4) скоростью вращения  $n$  (в об/мин), 5) углом  $\beta$  сдвига щеток с геометрической магнитной нейтрали.

Связь между перечисленными пятью величинами можно представить в виде неявной функции:

$$F(U, I_a, i_n, n, \beta) = 0, \quad (407)$$

которую называют характеристичным уравнением генератора постоянного тока.

Для генераторов постоянного тока всегда  $\beta = \text{const}$  и, как правило,  $n = \text{const}$ ,<sup>1</sup> поэтому для большинства случаев уравнение (407) можно представить в виде функции трех величин —  $U$ ,  $I_a$  и  $i_n$ :

$$f_g(U, I_a, i_n) = 0. \quad (408)$$

#### 164. Подразделение характеристик генераторов постоянного тока

Из-за нелинейного характера кривой намагничивания генератора прибегают к графическому изображению зависимостей, обнимаемых уравнением (408), которые получили название характеристик генераторов постоянного тока.

Так как уравнение (408) является уравнением поверхности, то обычно прибегают к сечению поверхности плоскостями, параллельными координатным плоскостям. Такие сечения дают связь между двумя величинами при постоянной третьей, а потому получаем нижеследующие три серии характеристик:

1) характеристики при постоянном значении тока якоря,  $I_a = \text{const}$ .

$$f_I(U, i_n) = 0; \quad (409)$$

2) характеристики при постоянном значении тока возбуждения,  $i_n = \text{const}$ :

$$f_i(U, I_a) = 0, \quad (410)$$

3) характеристики при постоянном значении напряжения на зажимах якоря,  $U = \text{const}$ :

$$f_U(I_a, i_n) = 0. \quad (411)$$

---

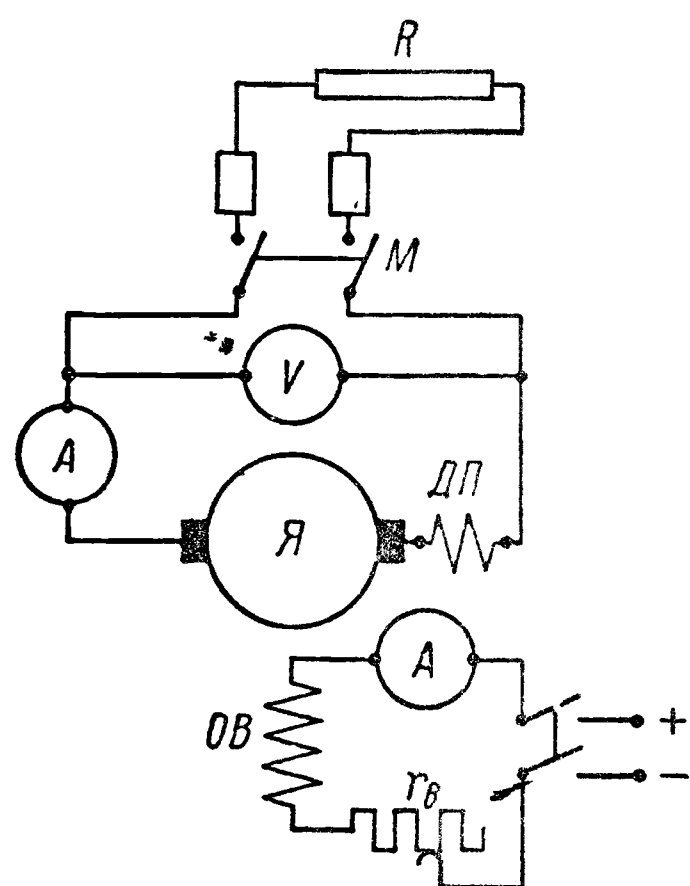
<sup>1</sup> Исключение составляют, например, генераторы с приводом от самолетных двигателей внутреннего сгорания, скорость вращения которых меняется в отношении 1:2. Другое исключение представляют генераторы для освещения железнодорожных вагонов с приводом от вагонной оси и с изменением скорости в отношении 1:3. Третий пример: генераторы ветросиловых установок.

Так как у самовозбуждающихся генераторов постоянного тока ток возбуждения  $i_n$  зависит или от напряжения  $U$  (параллельный генератор), или от тока якоря  $I_a$  (последовательный генератор), или от  $U$  и  $I_a$  (смешанный генератор), то для них мы не имеем всех перечисленных серий характеристик. Полный комплект серий характеристик получаем, таким образом, только для независимо возбуждаемого генератора постоянного тока; с рассмотрения его характеристик мы и начнем

## А. ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕЗАВИСИМО ВОЗБУЖДАЕМОГО ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 165. Характеристики независимо возбуждаемого генератора постоянного тока при $I_a = \text{const}$

Придавая  $I_a$  ряд значений в пределах от  $I_a = 0$  до  $I_a = I_N$ , получим серию характеристик  $f_I(U, i_n) = 0$ . Так как подобная характеристика при  $I_a = 0$  имеет особое значение, то ей присваивают особое наименование х а р а к т е р и с т и к и г е н е р а т о р н о г о х о л о с т о г о х о д а,<sup>1</sup> сокращенно х. г. х. х., и рассматривают отдельно. Все прочие характеристики  $f_I(U, i_n) = 0$  для  $I_a$  в указанных выше пределах объединяют под общим названием: внешние нагрузочные характеристики и рассматривают совместно



Фиг. 233. Схема соединений для исследования генератора с независимым возбуждением.

а) Характеристика генераторного холостого хода (х. г. х. х.). Она представляет зависимость напряжения  $U$  на зажимах якоря при вращении вхолостую ( $I_a = 0$ ) при неизменной скорости вращения  $n_N = \text{const}$  и при неизменном положении щеток на геометрической магнитной нейтрали,  $\beta = \text{const}$ . Так как при этом напряжение  $U$  генератора равно его э. д. с.,  $U = E$ , то имеем:

$$\left. \begin{aligned} E &= f(i_n) \text{ при } I_a = 0 = \text{const}, \\ n &= n_N = \text{const}, \beta = \text{const} \end{aligned} \right\} \quad (412)$$

Эта характеристика при соответствующем пересчете абсцисс и ординат (гл. II, § 56) дает кривую намагничивания машины

$$\Phi_a = f(i_n \omega_n), \quad (413)$$

чем и объясняется ее особое значение.

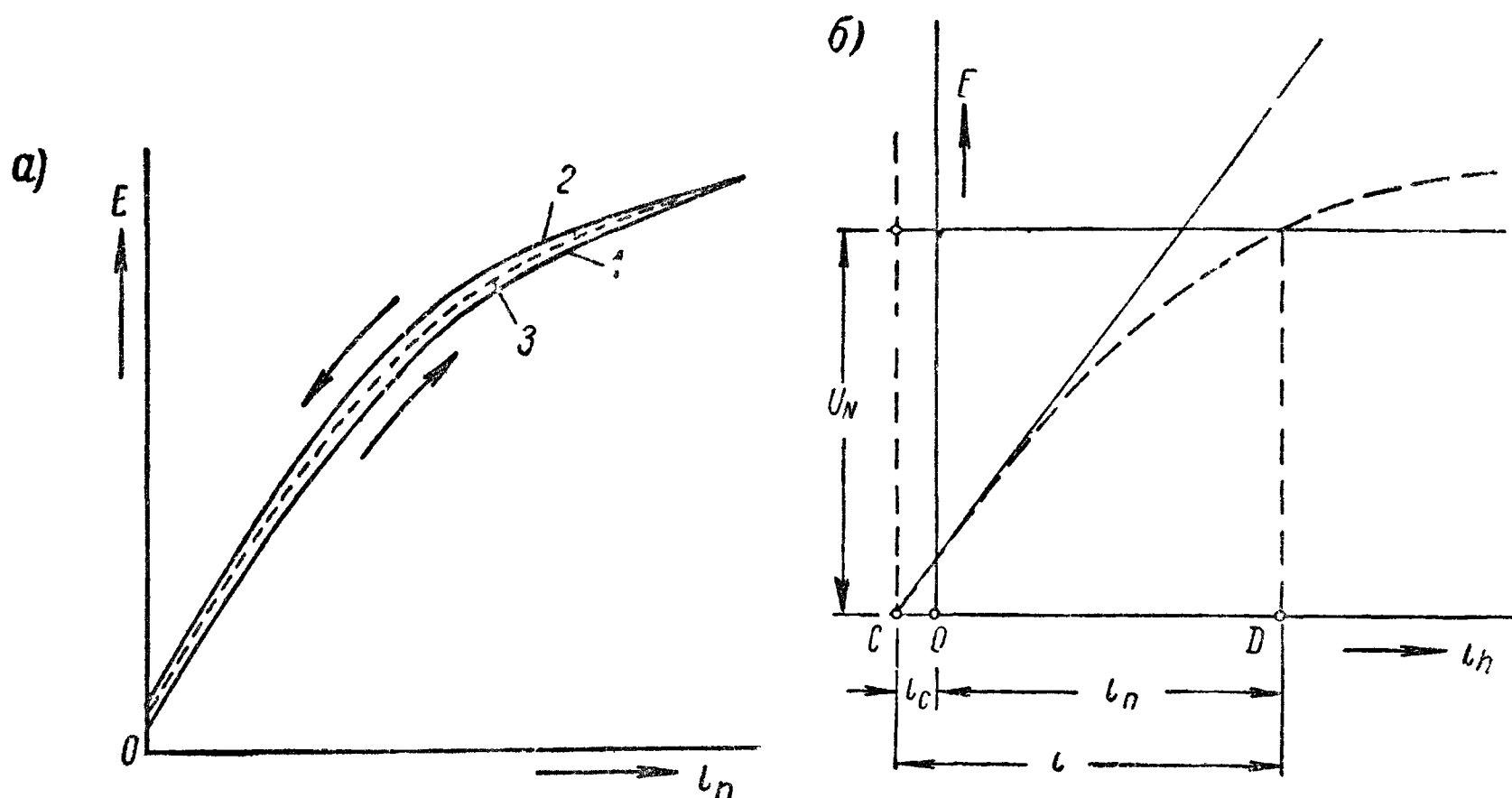
Схема для исследования независимо возбуждаемого генератора приведена на фиг. 233. В опыте рубильник  $M$  должен быть отключен. При снятии х. г. х. х.  $E = f(i_n)$  сначала увеличивают  $i_n$  до значения, при котором получается  $E = (1,15 \div 1,20) U_N$ , а затем уменьшают  $i_n$  до нуля<sup>2</sup>. В обоих случаях идут примерно через равные промежутки тока в цепи возбуждения, воздействуя на реостат  $r_b$  с таким расчетом, чтобы получить 8—10 точек, расположенных на оси абсцисс, примерно равномерно

<sup>1</sup> В наименование введен термин «генераторного», чтобы отличить от «характеристики двигательного холостого хода», рассматриваемой в разделе двигателей и имеющей совсем другой физический смысл.

<sup>2</sup> Для больших машин повышенного напряжения превышение номинального напряжения на 15—20% может оказаться недопустимым. В этом случае снятие характеристики холостого хода следует начинать с наибольшего допустимого напряжения.

Нанося на график (фиг. 234, а) точки, снятые при возрастании  $i_n$ , получим восходящую ветвь х. г. х. х. (кривая 1). Кривая начинается не от нуля, а от точки, лежащей на оси ординат несколько выше, т. е. при  $i_n = 0$  мы имеем уже некоторую э. д. с.  $E = E_c$ , которая создается остаточным магнетизмом.

Если, начиная с максимального значения тока возбуждения, будем уменьшать его до нуля и наносить соответствующие точки на тот же график, то получим кривую 2, — нисходящую ветвь х. г. х. х., которая ляжет выше кривой 1. Это явление объясняется гистерезисом железа. Вследствие этого при снятии х. г. х. х. надлежит производить изменение  $i_n$  все время в одном и том же



Фиг. 234. Характеристика генераторного холостого хода.

направлении, т. е. либо в сторону увеличения, либо в сторону уменьшения (иначе мы будем описывать гистерезисные циклы и опыт даст неправильные результаты). Снимая кривую 2, мы придем при  $i_n = 0$  к значению остаточной э. д. с.  $E_c'$ , которое, вообще говоря, будет несколько больше  $E_c$ . Остаточная э. д. с.  $E_c$  не имеет устойчивого значения и в случае, если генератор долго находился без работы, в особенности, если он подвергался тряске, например при перевозке, то э. д. с.  $E_c$  может совсем исчезнуть.

Можно рекомендовать, прежде чем снимать х. г. х. х., произвести увеличение  $i_n$  до значения, дающего  $(1,15 \div 1,20) U_N$ , и затем уменьшить до нуля, не производя записей показаний приборов, и затем уже начать снимать х. г. х. х. так, как было указано выше.

Проведя среднюю кривую 3 (пунктир) между кривыми 1 и 2, получим так называемую опытную практическую х. г. х. х., которая при продолжении прямолинейно за ось ординат влево, пересечет ось абсцисс в некоторой точке С. Отрезок  $\overline{CO}$  называется коэрцитивной силой, он дает как бы запасенные в машине некоторые намагничивающие ампервитки. Переносим ось ординат в точку С, получим фиг. 234, б. Здесь  $i_c$  — коэрцитивная сила, измеренная в масштабе тока возбуждения,  $i_n$  — ток в обмотке возбуждения,  $i$  — полный ток намагничивания.

$$i = i_c + i_n \quad (414)$$

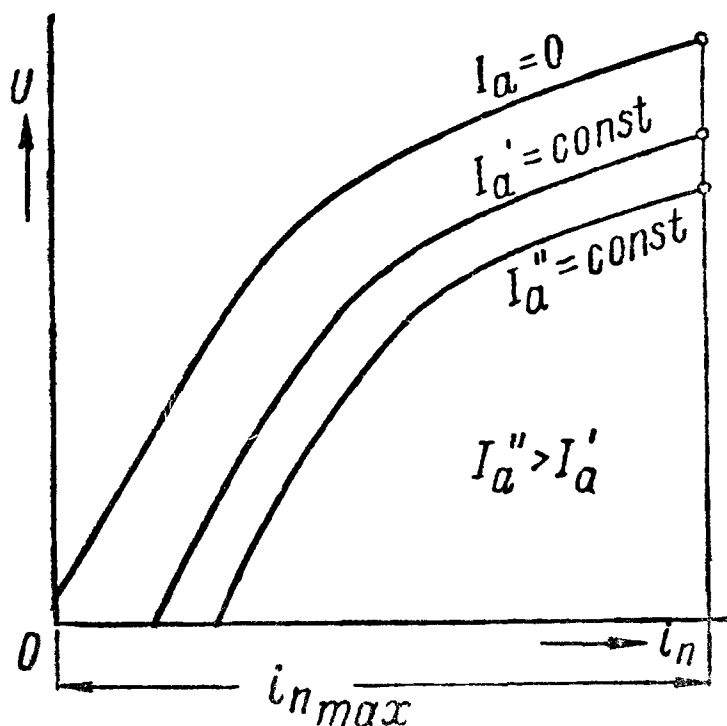
Наибольшее расхождение между восходящей и нисходящей ветвями х. г. х. х. в генераторах, в которых сердечники полюсов и ярмо сделаны из стали, составляет обычно не более 3% от среднего значения  $E$  при данном  $i_n$ . Если сердечники полюсов и ярмо сделаны из чугуна, то эта разность доходит до 6%. Э. д. с. остаточного намагничивания составляет обычно от 2



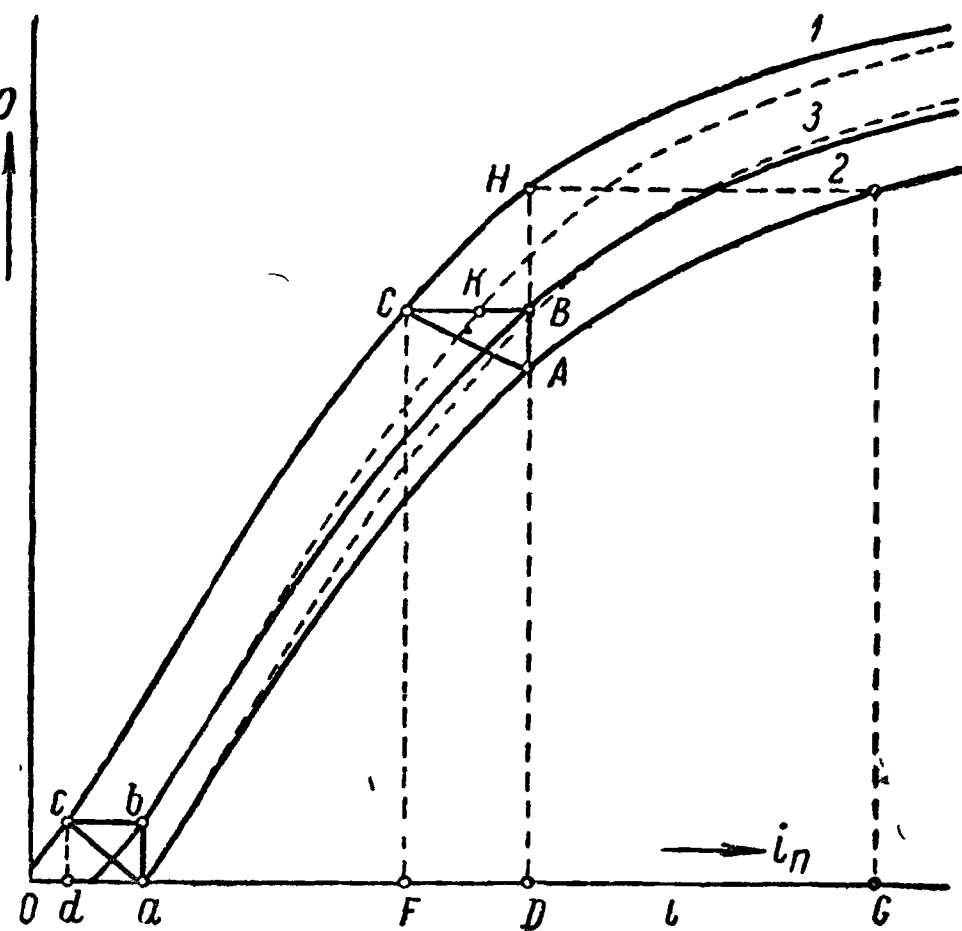


дения напряжения в контактах щеток  $2\Delta U$  (здесь  $\Delta U$  — падение напряжения под щетками одной полярности) и 2) вследствие размагничивающего действия реакции якоря.

Так как падение напряжения от сопротивления и от размагничивающего действия реакции якоря будет тем больше, чем больше  $I_a$ , то, очевидно, внешняя нагрузочная характеристика будет лежать тем ниже относительно х. г. х. х., чем больше  $I_a$  (фиг. 236); при этом, если снимать все внешние нагрузочные характеристики от одного и того же значения  $i_{n \max}$ , то начальные точки всех характеристик будут лежать по одной вертикали, проведенной через  $i_{n \max}$ .



Фиг. 236. Внешние нагрузочные характеристики генератора с независимым возбуждением.



Фиг. 237. Характеристика генераторного холостого хода (1), внешняя (2) и внутренняя (3) нагрузочные характеристики.

При снятии внешней нагрузочной характеристики рубильник  $M$  должен быть замкнут; характеристику нужно снимать, отправляясь от  $i_{n \max}$ , вниз до значения, соответствующего  $U = 0$ ; при всяком значении  $i_n$  ток якоря  $I_a$  нужно поддерживать неизменным посредством реостата  $R$ , включаемого рубильником  $M$ .

Обычно снимают внешние нагрузочные характеристики, не доводя их до  $U = 0$ ; в этом случае удовлетворяются только нисходящими ветвями их и сравнивают последние не с опытной х. г. х. х., а с ее нисходящей ветвью (кривая 2, фиг. 234, а)

На фиг. 236 построены только нисходящие ветви внешних нагрузочных характеристик и нисходящая ветвь х. г. х. х.

Прибавляя в каждой точке внешней нагрузочной характеристики, снятой для  $I_a = \text{const}$ , отрезок  $I_a R + 2\Delta U_B$ , получаем внутреннюю нагрузочную характеристику (фиг. 237, кривая 3). Она представляет зависимость э. д. с., индуцируемой в якоре при токе  $I_a$ , от тока  $i_n$  в обмотке возбуждения: <sup>1</sup>

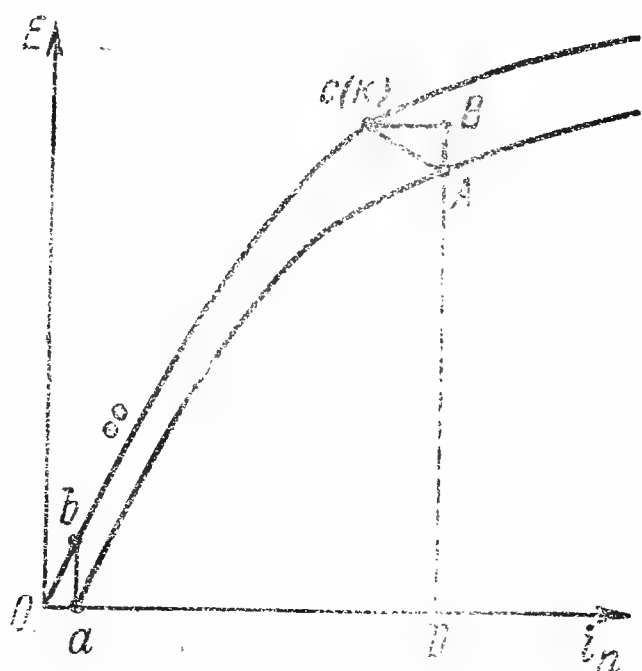
$$\left. \begin{aligned} E_b &= f(i_n) \text{ при } I_a = \text{const}; \quad (I_a > 0); \\ n &= n_N = \text{const}; \quad \beta = \text{const}. \end{aligned} \right\} \quad (417)$$

Рассмотрим фиг. 237, на которой нанесены х. г. х. х. (кривая 1), внешняя и внутренняя нагрузочные характеристики для значения  $I_a = I_N = \text{const}$  (кривые 2 и 3). Через точку на оси абсцисс  $D$  для  $i_n = \overline{OD}$  проведем вертикаль и отметим точки пересечения вертикали с кривыми, точки  $A$ ,  $B$

<sup>1</sup> Э. д. с., индуцируемую в этом случае в якорной обмотке, мы обозначаем через  $E_b$ , чтобы подчеркнуть, что это э. д. с., индуцируемая при нагрузке

и  $H$ . При возбуждении  $i_n = \overline{OD}$  мы имели бы при холостом ходе (кривая 1) на зажимах генератора напряжение  $U = \overline{HD}$ . При данном же значении тока якоря  $I_a$  имеем  $U = \overline{AD}$ . Отрезок  $\overline{AH}$  представляет собой, таким образом, падение напряжения. Часть его, равная отрезку  $\overline{AB}$ , обусловлена падением от сопротивления якоря и в контакте щеток:  $\overline{AB} = I_a R_a + 2\Delta U_B$ , остальная часть, отрезок  $\overline{HB}$ , вызвана размагничивающим действием реакции якоря.

Размагничивающие ампервитки якоря нетрудно определить в масштабе тока возбуждения (т. е. размагничивающие ампервитки якоря, деленные на число витков обмотки возбуждения), для этого достаточно провести через



Фиг. 238. Внешняя нагрузочная характеристика генератора с независимым возбуждением при щетках, стоящих на геометрической магнитной нейтрали (2), и характеристика генераторного х. х. (1).

точку  $B$  прямую, параллельную оси абсцисс, до пересечения с х. г. х. в точке  $C$ . Тогда  $\overline{BC} = \overline{FD}$  — размагничивающие ампервитки якоря, измеренные в масштабе тока  $i_n$ . Если бы мы хотели при данном токе якоря  $I_a$  восстановить на зажимах якоря то же напряжение  $\overline{HD}$ , которое было при холостом ходе, то нам пришлось бы усилить возбуждение до значения  $\overline{OG}$  (фиг. 237).

Внешняя нагрузочная характеристика пересекает ось абсцисс в точке  $a$ . Напряжение на зажимах якоря при токе возбуждения  $i_n = \overline{Oa}$  равно нулю, следовательно, мы имеем короткое замыкание генератора. При неизменной температуре обмотки якоря отрезок  $\overline{ab} = \overline{AB} = I_a R_a + 2\Delta U_B$  и представляет собой индуцируемую в якоре э. д. с. при короткозамкнутом якоре.

Проводя через  $b$  линию, параллельную оси абсцисс, до пересечения с х. г. х. в точке  $c$  и опустив из  $c$  перпендикуляр  $\overline{cd}$ , получим на оси абсцисс отрезок  $\overline{Od}$ ; этот отрезок определяет то возбуждение, которое потребовалось бы при холостом ходе генератора для создания в обмотке якоря э. д. с., равной  $\overline{ab} = \overline{cd}$ . Очевидно, что отрезок  $\overline{da} = \overline{cb}$  определяет собой размагничивание от реакции якоря при возбуждении  $\overline{Oa}$ . Сравнивая  $\overline{cb}$  с  $\overline{CB}$ , видим, что  $\overline{cb}$  меньше. Это и понятно, так как размагничивание якоря при токе возбуждения  $i_n = \overline{OD}$  вызывается тремя причинами: 1) наличием продольно действующих ампервитков якоря  $pAW_g$ ; <sup>1</sup> 2) наличием размагничивающей составляющей  $pAW_e$  поперечно действующих ампервитков якоря; 3) наличием размагничивающего действия коммутационных токов (ампервитки  $pAW_k$ ). При неизменном положении щеток на коллекторе ( $\beta = \text{const}$ ) и неизменном токе якоря  $I_a$  продольно действующие ампервитки якоря  $pAW_g$  и ампервитки  $pAW_k$  остаются при всех значениях тока возбуждения  $i_n$  одними и теми же; на отрезке  $\overline{BC}$  они изображены через  $\overline{KC}$ ; что же касается ампервитков  $pAW_e = \overline{BK}$ , то с уменьшением насыщения генератора они постепенно уменьшаются и при коротком замыкании (когда поток генератора очень мал, и мы имеем возбуждение  $i_n = \overline{Oa}$ , которому соответствует э. д. с. холостого хода, определяемая начальной прямолинейной частью характеристики холостого хода) они совершенно исчезают,  $pAW_e = 0$ . Поэтому, передвигая

<sup>1</sup>  $AW_g$  рассчитаны на пару полюсов; так как х. г. х. строится в зависимости от тока  $i_n$  или, что то же, от  $i_n \omega_n$ , где  $\omega_n$  — число витков обмотки возбуждения на всех магнитных полюсах, то вместо  $AW_g$  и  $AW_e$  нужно откладывать  $pAW_g$ ,  $pAW_e$ , т. е. числа ампервитков на  $p$  пар магнитных полюсов.

треугольник  $ABC$ , при сохранении параллельности его сторон, так, чтобы точка  $A$  оставалась на внешней нагрузочной характеристике, а точка  $C$  двигалась по характеристике холостого хода, мы придем к положению его  $abc$ , при этом  $\overline{BC}$  от значения  $\overline{BC} = \overline{BK} + \overline{KC}$  уменьшается до  $\overline{bc} = \overline{KC}$ .

Если щетки стоят на коллекторе в положении, соответствующем магнитной нейтрали,  $\beta = 0$ , то  $rAW_o = \overline{KC} = 0$ . Тогда фиг. 237 переходит в фиг. 238, на которой  $\overline{BC} = \overline{BK} = rAW_o$ .<sup>1</sup> При передвижении треугольника  $ABC$  к оси абсцисс горизонтальный катет делается равным нулю и треугольник  $ABC$  превратится в вертикальный катет  $\overline{ab}$ .

Треугольник  $ABC$  (фиг. 237) носит название **характеристического треугольника**.

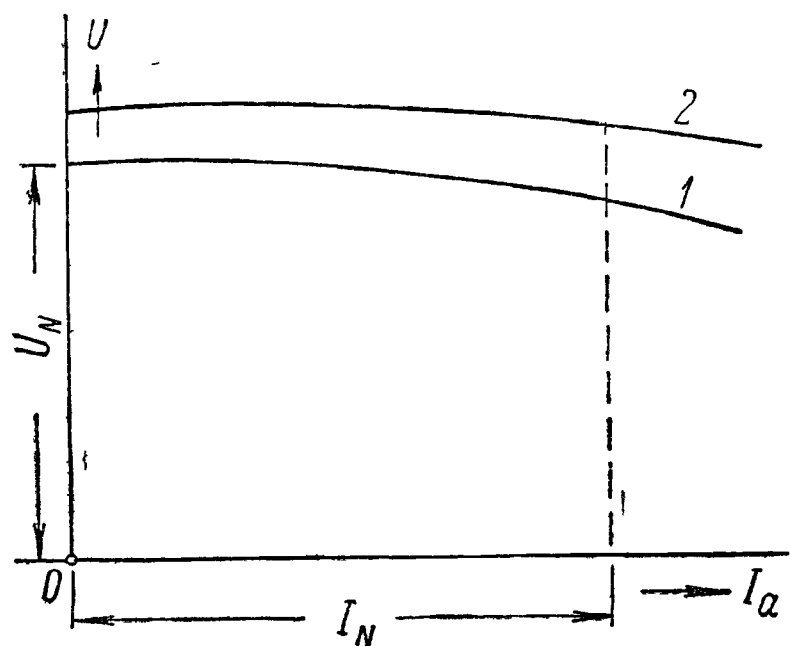
#### 166. Характеристики независимо возбуждаемого генератора постоянного тока при $i_n = \text{const}$

а) Внешняя (или рабочая) характеристика:

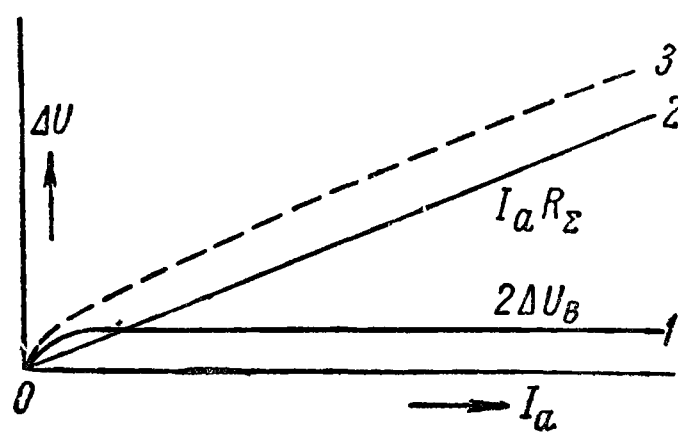
$$\begin{aligned} U &= f(I_a) \text{ при } i_n = \text{const} \\ n &= n_N = \text{const}, \beta = \text{const} \end{aligned} \quad (418)$$

представлена на фиг. 239 (кривые 1 и 2).

Обычно интерес представляет  $U = f(I_a)$  как при неизменном токе возбуждения, равном значению, которое при  $I_a = 0$  (т. е. при холостом ходе) дает на зажимах якоря э. д. с., равную номинальному напряжению:  $E_{oN} = U_N$  (кривая 1), так и при неизменном токе



Фиг. 239. Внешняя (рабочая) характеристика независимо возбуждаемого генератора.



Фиг. 240. Кривые падения напряжения в контакте щетки (1), цепи якоря (2) и суммарного (3)

возбуждения, равном значению, которое при  $I_a = I_N$  (т. е. при номинальном токе якоря) дает на зажимах якоря номинальное напряжение (кривая 2).

Остановимся на причинах, вызывающих указанный характер изменения  $U$  в зависимости от  $I_a$ .

Падение напряжения в контакте щеток  $\Delta U_B$  в зависимости от плотности тока  $j_B$  под щеткой сначала быстро возрастает, а потом становится почти постоянным, при этом под положительной щеткой оно больше, чем под отрицательной. Учитывая это обстоятельство и считаясь со средним значением  $\Delta U_B$  под щетками обеих полярностей, можем изобразить  $\Delta U_B$  в зависимости от тока якоря  $I_a$  кривой 1, которая, начиная с некоторого значения  $I_a$ , становится параллельной оси абсцисс ( $2\Delta U_B = \text{const}$ ); обычно принимают  $2\Delta U \approx 2e$  (фиг. 240).

<sup>1</sup> Пренебрегаем влиянием коммутационных токов.



Если положить, как это часто делают, что

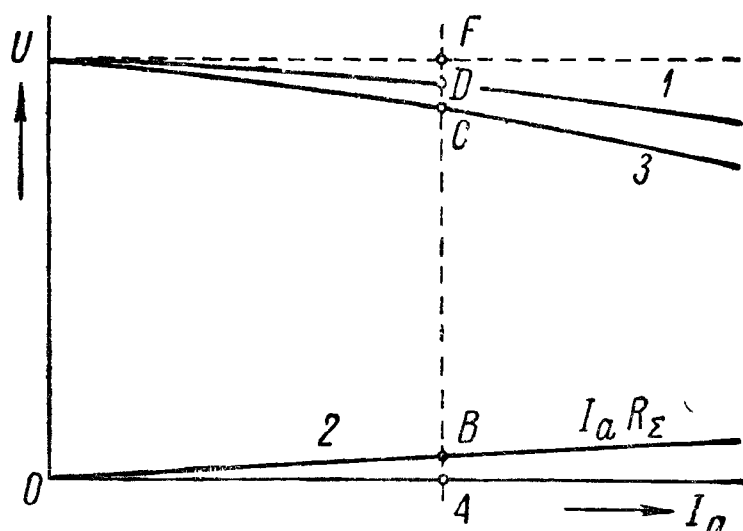
$$2\Delta U_B \approx I_a R_B, \quad (419)$$

где  $R_B$  — сопротивление контакта щеток, определенное для номинального тока машины и принимаемое неизменным, то можем написать:

$$I_a R_a + 2\Delta U_B \approx I_a (R_a + R_B) = I_a R_\Sigma. \quad (420)$$

Здесь  $R_\Sigma$  — сопротивление обмотки якоря  $R_a$  плюс сопротивление контакта щеток,<sup>1</sup> принятое при неизменной температуре якоря неизменным:

$$R_\Sigma = R_a + R_B = \text{const.} \quad (421)$$



Фиг. 241 Построение, иллюстрирующее влияние реакции якоря на внешнюю характеристику генератора с независимым возбуждением

Нанеся на фиг. 241  $I_a R_\Sigma$  в функции от  $I_a$ , получим прямую линию, проходящую через начало координат. Если бы уменьшение напряжения  $U$  на зажимах якоря происходило только из-за падения напряжения  $I_a R_\Sigma$ , то внешняя характеристика имела бы вид прямой, слегка наклоненной к оси абсцисс (фиг. 241, кривая 1). В действительности, из-за реакции якоря  $U$  будет убывать более значительно (фиг. 241, кривая 3). Реакция якоря сказывается в размагничивающем действии ампервитков якоря

$pAW_r = pAW_g + pAW_e$ . Размагничивающие продольно действующие ампервитки якоря<sup>2</sup>  $pAW_g$  прямо пропорциональны току  $I_a$ , размагничивающие ампервитки  $pAW_e$  от поперечно действующих ампервитков якоря не пропорциональны току. Однако в пределах изменения тока  $I_a$  от 0 до  $I_N$  для машины, в которой точка номинального напряжения  $E_N$  лежит за коленом х. г. х. х., мы можем принять в первом приближении, что сумма ампервитков  $pAW_r = pAW_g + pAW_e$  пропорциональна току  $I_a$ . Для машины со щетками, стоящими строго на геометрической магнитной нейтрали, размагничивающие ампервитки якоря от поперечной реакции якоря  $pAW_e$  можно также принять, в первом приближении, пропорциональными току  $I_a$ . По этой причине для построения внешней характеристики по х. г. х. х. можно прибегнуть к помощи характеристичного треугольника, считая у него катеты пропорциональными току якоря  $I_a$ .

б) Построение внешней характеристики. Построение ведем следующим образом. Откладываем на оси абсцисс х. г. х. х. (фиг. 242) отрезок  $\overline{OA}$ , равный току возбуждения  $i_{n0}$ , который при холостом ходе дает на зажимах якоря номинальное напряжение  $E_{oN} = U_N$ ; строим у точки  $A$  характеристичный треугольник, определенный по х. г. х. х. и внешней нагрузочной характеристике для  $I_a = I_N = \text{const.}$  Стороны его  $\overline{AB} = I_N R_\Sigma$  и  $\overline{BC} = \frac{pAW_r}{w_n}$ , где  $w_n$  — полное число витков обмотки возбуждения. Проведя через точку  $C$  вертикаль до пересечения ее с х. г. х. х. в точке  $s$ , передвигаем треугольник  $ABC$  в положение  $abc$ . Ордината  $\overline{Aa}$  даст напряже-

<sup>1</sup> Если генератор имеет обмотку добавочных полюсов и компенсационную, то в  $R_\Sigma$  входят и их сопротивления  $R_w$  и  $R_c$

$$R_\Sigma = R_a + R_B + R_w + R_c$$

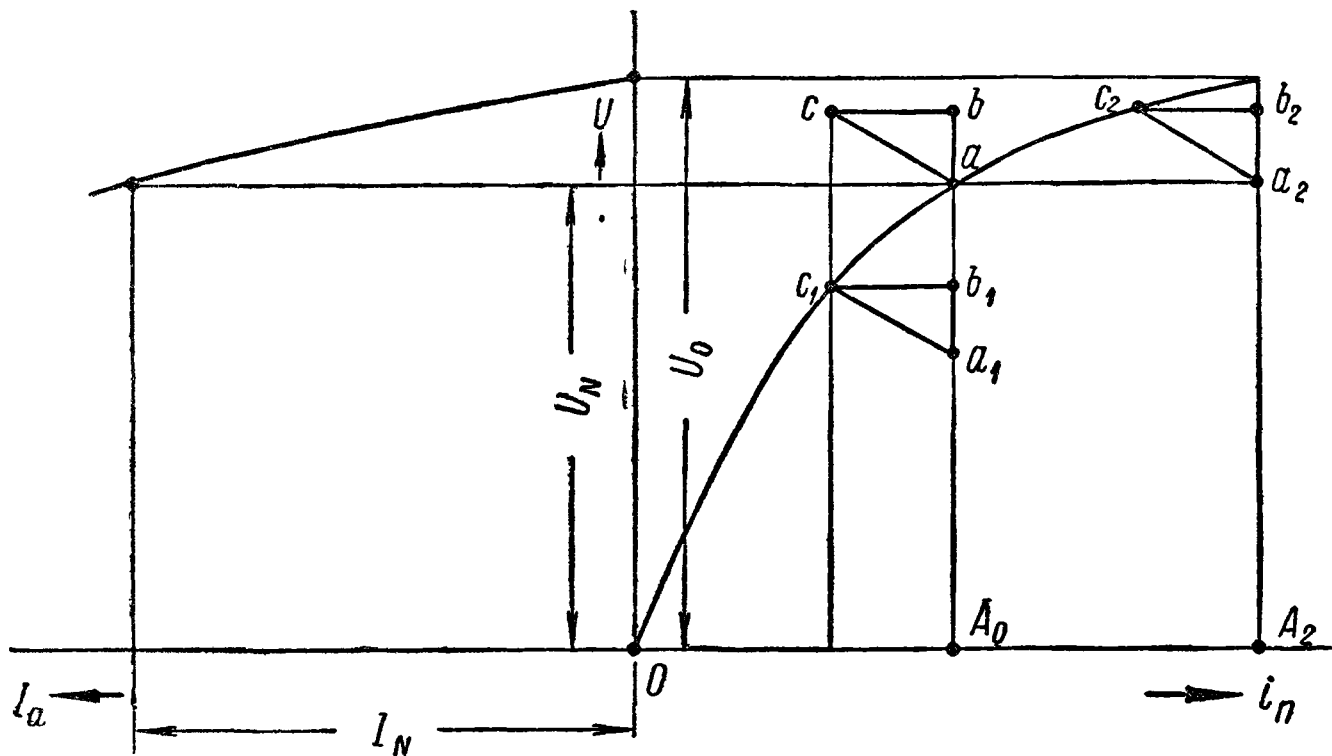
<sup>2</sup> Если они имеются, т. е. если щетки сдвинуты с геометрической магнитной нейтрали.





номинальном напряжении  $U_N$ , разгрузить до  $I_a = 0$ , оставляя неизменным ток возбуждения. Очевидно, что в этом случае ток возбуждения будет больше  $i_{n0}$ ; обозначаем его через  $i_{nN}$  и будем называть номинальным током возбуждения, так как он соответствует номинальной нагрузке генератора ( $U_N$ ,  $I_N$ ,  $n_N$ ). Уменьшив постепенно нагрузку до нуля, получим  $U' > U_N$ , т. е. получим повышение напряжения:

$$\xi = \frac{U' - U_N}{U_N}. \quad (423)$$



Фиг. 243. Определение процентного повышения напряжения генератора с независимым возбуждением.

Пусть на фиг. 243 точка  $A_0$  соответствует току возбуждения  $i_{n0}$ , при котором на зажимах ненагруженного якоря получаем  $U_N$ . Построив у точки  $a$  характеристичный треугольник  $abc$ , определенный для  $I_N$ , передвинем его параллельно оси абсцисс до совпадения точки  $c$  с х. г. х. — точка  $c_2$ . Очевидно, что теперь абсцисса, соответствующая точке  $a_2$ , даст нам возбуждение, при котором при нагрузке мы будем иметь как раз  $U_N$ .

Если бы мы имели при холостом ходе  $U_N$ , то при нагрузке получили бы на зажимах генератора напряжение  $U = \overline{A_0 a_1}$ . Чем дальше за коленом х. г. х. лежит точка  $a$ , точка номинальной работы, тем меньше будет падение напряжения и тем меньше будет разница между ним и повышением напряжения.

На основании этого можно сказать, что для получения малых изменений напряжения нужно рассчитывать генератор так, чтобы он был при холостом ходе с номинальным напряжением достаточно насыщенным. Такие генераторы, однако, стоят значительно дороже, а потому на практике ставят обычно условие, чтобы генератор имел повышение напряжения не более определенной величины.

Ныне генераторы стоят, как правило, с добавочными полюсами; в них падение напряжения составляет не более нескольких процентов.

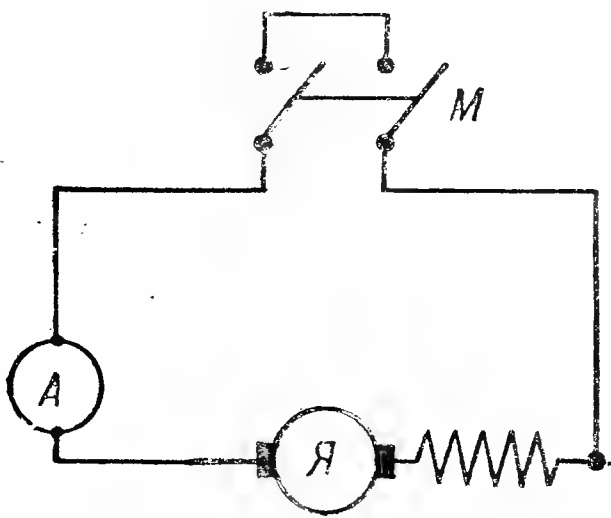
#### 167. Характеристики независимо возбуждаемого генератора постоянного тока при $U = \text{const}$

**а) Регулировочная характеристика.** В эксплуатации обычно стремятся поддерживать напряжение  $U = U_N = \text{const}$ , для чего требуется регулировать ток возбуждения. Зависимость

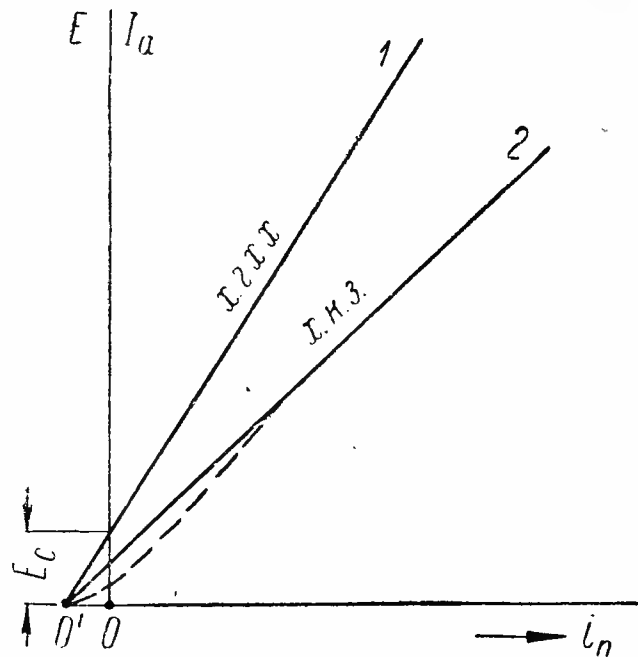
$$\left. \begin{aligned} i_n &= f(I_a) \text{ при } U = U_N = \text{const}, \\ n &= n_N = \text{const}, \beta = \text{const} \end{aligned} \right\} \quad (424)$$



при замыкании зажимов якоря, вращающегося со скоростью  $n_N$ , накоротке и разомкнутом рубильнике возбуждения ( $i_n = 0$ ) появится некоторый ток, он равен э. д. с.  $E_c$ , деленной на сопротивление короткозамкнутого якоря, включая сопротивление контакта щеток. При дальнейшем увеличении  $i_n$  зависимость  $I_{ak} = f(i_n)$  должна иметь прямолинейный характер до тех пор, пока  $E$  лежит на прямолинейной части х. г. х. х., так как вся э. д. с.  $E$  идет на падение напряжения в цепи якоря, которое принимаем неизменным ( $R_\Sigma = R_a + R_B = \text{const}$ ), а следовательно,  $I_{ak} R_\Sigma = I_{ak}$ . Продолжив



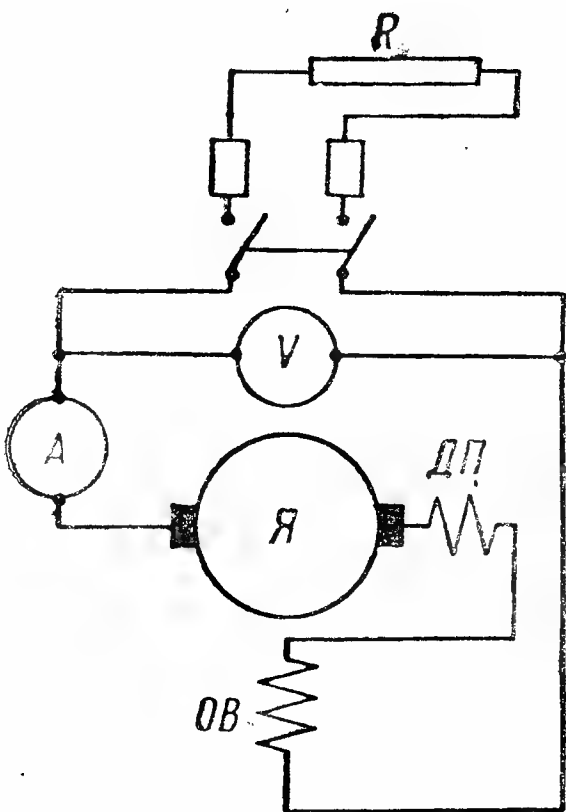
Фиг. 246. Схема соединений для снятия характеристики короткого замыкания.



Фиг. 247. Характеристики холостого хода (1) и короткого замыкания (2) генератора с независимым возбуждением.

$I_{ak} = f(i_n)$  за ось ординат до пересечения с осью абсцисс, мы попадем в точку  $O'$ , представляющую собой продолжение за ось ординат х. г. х. х. (фиг. 247). Отметим, что практически характеристика короткого замыкания не имеет прямолинейного характера при малых значениях тока в якоря (фиг. 247, пунктирная кривая). Происходит это вследствие того, что переходное сопротивление контакта щеток возрастает при малых значениях тока якоря.

Практического значения характеристика короткого замыкания не имеет. Раньше применяли ее для получения характеристического треугольника, что, как было пояснено выше, дает неправильные результаты.



Фиг. 248. Схема соединений генератора с последовательным возбуждением.

## Б. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 168. Общее замечание

В общем виде мы можем написать, что ток возбуждения в последовательном генераторе  $I_s$  выражается через ток якоря  $I_a$  формулой:

$$i_n = I_s = \gamma I_a. \quad (426)$$

Нормально постоянная  $\gamma = 1$ . Характеристическое уравнение принимает вид:

$$f_g(U, I_a) = 0. \quad (427)$$

Таким образом, для последовательного генератора мы имеем лишь одну основную характеристику; она дает зависимость напряжения  $U$  на зажимах генератора от тока  $I_a$  якоря и носит название внешней характеристики:

$$\left. \begin{aligned} U &= f(I_a) \\ \text{при } n &= n_N = \text{const}, \quad \beta = \text{const.} \end{aligned} \right\} \quad (428)$$

Схема для снятия характеристики приведена на фиг. 248.

### 169. Характеристики последовательного генератора постоянного тока, получаемые при измененной схеме соединений возбуждающей и якорной обмоток

а) Характеристика холостого хода последовательного генератора. Как явствует из § 168, такой характеристики последовательного генератора не существует, так как в нем магнитный поток создается током, проходящим по якорю, а следовательно, когда  $I_a = 0$ , то напряжение на зажимах якоря может создаваться только за счет остаточного магнетизма, и при  $n = n_N = \text{const}$  оно не поддается изменению и имеет незначительную величину, как и в случае генератора с независимым возбуждением (2—6% от  $U_N$ ).

Так как х. г. х. х. является в то же время и кривой намагничивания генератора, то для суждения о свойствах последовательного генератора знание х. г. х. х. весьма важно. Для получения ее последовательный генератор нужно, очевидно, превратить в генератор с независимым возбуждением, присоединив обмотку возбуждения к независимому источнику эл. энергии. При этом нужно помнить, что сопротивление обмотки возбуждения в последовательном генераторе имеет то же порядкок, что и сопротивление якоря, т. е. очень мало. Поэтому если для снятия х. г. х. х. обмотку возбуждения приходится питать от сети того напряжения, на которое рассчитан генератор, то приключение обмотки к сети необходимо делать через реостат, рассчитанный на ток  $I_a$ , который мог бы поглотить почти все напряжение сети. Снятие х. г. х. х. производится согласно указаниям § 165.

б) Нагрузочные характеристики. Эти характеристики так же, как и х. г. х. х., приходится снимать при независимом возбуждении. Метод снятия этих характеристик, как в § 166.

в) Характеристика короткого замыкания. Ее также нужно снимать при независимом возбуждении, но она не имеет значения, как указывалось в § 167, п. «б» и ее не имеет смысла снимать.

### 170. Внешняя, или рабочая, характеристика последовательного генератора постоянного тока

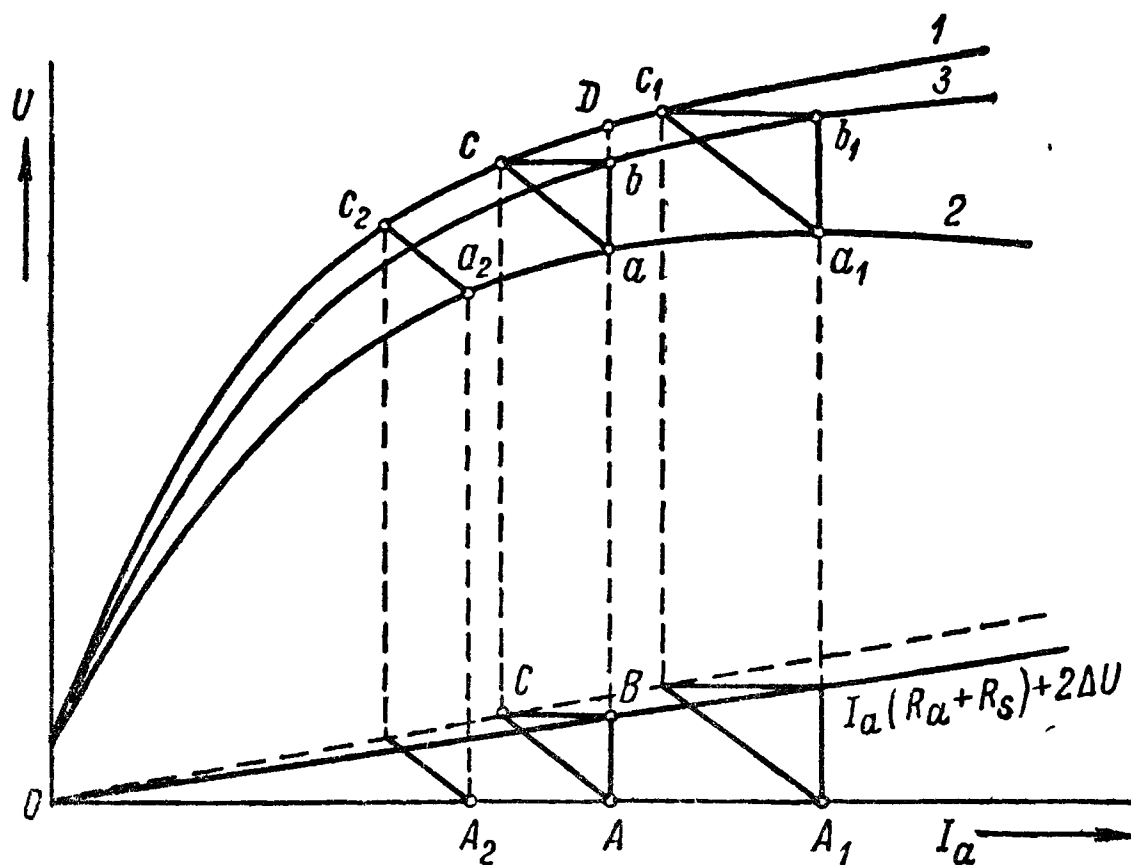
Так как в последовательном генераторе по обмотке возбуждения проходит тот же ток, что и по якорю, то индуктируемая э. д. с., а следовательно, и напряжение на зажимах якоря, растут с увеличением тока нагрузки генератора. По своему внешнему виду эта характеристика имеет большое сходство с х. г. х. х., однако есть одно существенное отличие. При больших насыщениях х. г. х. х. имеет, хотя и незначительный, но все же неизменный подъем (фиг. 249, кривая 1), внешняя же характеристика последовательного генератора имеет при некотором значении тока  $I_a$  максимум, после которого начинает падать (фиг. 249, кривая 2).

Если к ординатам внешней характеристики прибавить падение напряжения в якоре, в обмотке возбуждения и в контакте щеток, равное  $I(R_a + R_s) + 2\Delta U_B$ , то получим внутреннюю характеристику нагрузки (кривая 3). При некотором токе  $\overline{OA}$  полное падение напряжения от того значения  $\overline{AD}$ , которое получилось бы при холостом ходе (по схеме независимого возбуждения), до того значения, которое получается при работе последовательного генератора под нагрузкой при нормальной схеме соединения его обмоток, выражается на фиг. 249 отрезком  $\overline{Da} = \overline{ab} + \overline{bD}$ , где  $\overline{ab}$  — падение напряжения от сопротивлений, а  $\overline{bD}$  — падение напряжения, вызываемое реакцией якоря.

Зная х. г. х. х. и характеристичный треугольник для номинального значения тока якоря  $I_a = I_N$ , можно построить внешнюю характеристику. При построении, выполненном на фиг. 249, сделано предположение, что сто-



роны характеристичного треугольника остаются пропорциональными току  $I_a$  что, как мы знаем, не соответствует действительности. Построение ведется следующим образом: у точки  $A$  на оси абсцисс, соответствующей номинальному току  $I_N$  генератора, строим характеристичный треугольник  $ABC$  и передвигаем его параллельно оси ординат до совпадения точки  $C$  с х. г. х. х., т. е. в положение  $abc$ . Тогда, очевидно, точка  $a$  будет соответствовать внешней характеристике нагрузки, а точка  $b$  — внутренней характеристике нагрузки. При другом значении тока генератора, например  $\overline{OA_1}$ , построение, выполненное таким же способом, не нуждается в пояснении. Стороны треугольника  $abc$ , очевидно, пропорциональны  $\overline{OA_1}$ . Из сопоставления построений для двух



Фиг. 249. Построение внешней характеристики последовательного генератора.

значений тока генератора явствует, что для получения других точек построение можно упростить, а именно проводить только гипотенузу треугольника  $abc$ , пропорциональную току, как это сделано для тока  $\overline{OA}_2$ .

Построенная указанным способом внешняя характеристика не будет вполне соответствовать действительной: для токов, превышающих  $I_N = \overline{OA}$ , точки внешней характеристики будут лежать выше действительных, а для токов меньше  $I_N$  — ниже. Причиной несовпадения построенной внешней характеристики с опытной является сделанное предположение, что размагничивающие ампервитки  $AW_r = AW_g + AW_e$  пропорциональны  $I_a$ , в то время как составляющих  $AW_e$  возрастает быстрее, чем ток  $I_a$ , а кроме того, и падение напряжения от сопротивления, строго говоря, не пропорционально току  $I_a$ .

## В. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА

## 171. Общие замечания

По своим свойствам параллельный генератор близок к независимо возбуждаемому генератору. Отличие в свойствах вызывается тем обстоятельством, что ток обмотки возбуждения  $i_n$  зависит от напряжения  $U$  на зажимах параллельного генератора:

$$i_n = \frac{U}{R_n} \text{ ,} \quad (429)$$



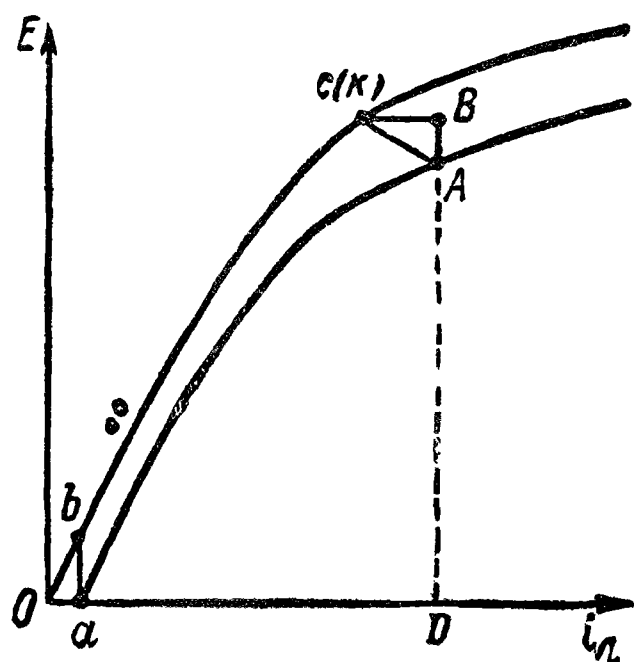
Вследствие относительной малости тока  $i_n$  указанные падения напряжения очень малы, и мы сохраняем за указанной характеристикой то же название, что и в случае генератора с независимым возбуждением, а именно характеристика холостого хода. Характеристика  $U = f(i_n)$  при  $I_g = 0$  мало отличается от  $E = f(i_n)$ , снятой при независимом возбуждении генератора.

Схема для исследования параллельного генератора приведена на фиг. 250. При снятии характеристики холостого хода рубильник  $M$  разомкнут. При производстве опыта необходимо соблюдать ту же тщательность при изменении тока  $i_n$ , что и в случае независимо возбуждаемого генератора, но здесь, кроме того, условие постоянства скорости  $n$  является жестким, так как всякое изменение  $n$  влечет за собой изменение индуктированной э. д. с., а следо-

вательно, и тока  $i_n$ . Если после установления некоторого  $i_n$  скорость  $n$  у нас возросла, то неизбежно возрастет  $E$  и  $i_n$ ; при возвращении к первоначальному значению  $n$  уменьшится и  $E$ , а с ним и  $i_n$ , но эти значения  $E$  будут уже другие, между тем как сопротивление цепи возбуждения осталось тем же; иными словами, мы будем находиться теперь уже на другом гистерезисном цикле.

Снять полный гистерезисный цикл при самовозбуждении, конечно, нельзя; его можно снять только перейдя на независимое возбуждение.

б) Внешняя нагрузочная характеристика параллельного генератора представляет собой зависимость:



Фиг. 251. Внешние нагрузочные характеристики параллельного генератора.

$$U = f(i_n) \text{ при } I_g = \text{const} > 0, \quad n = n_N = \text{const}; \quad \beta = \text{const.} \quad (434)$$

Эти характеристики мало отличаются от внешних нагрузочных характеристик, снятых при независимом возбуждении. Их следует снимать при убывающем  $i_n$ , начиная каждый раз с одного и того же значения тока возбуждения. Опыт ведем следующим образом: при разомкнутом рубильнике  $M$ , постепенно увеличивая  $i_n$ , доходим до значения, дающего номинальное напряжение  $U_N$ . Замкнув  $M$ , увеличиваем реостатом (уменьшая его сопротивление) ток  $I_g$  до того значения, при котором желаем получить внешнюю нагрузочную характеристику. Напряжение  $U$  на зажимах генератора при этом упадет, с ним упадет и ток  $i_n$ . Поэтому внешние нагрузочные характеристики будут начинаться от тем меньшего значения  $i_n$ , чем больше  $I_g$  (фиг. 251, кривые 2—4). На той же фигуре нанесена характеристика холостого хода (кривая 1), снятая вниз от того же максимального значения  $i_n$ .

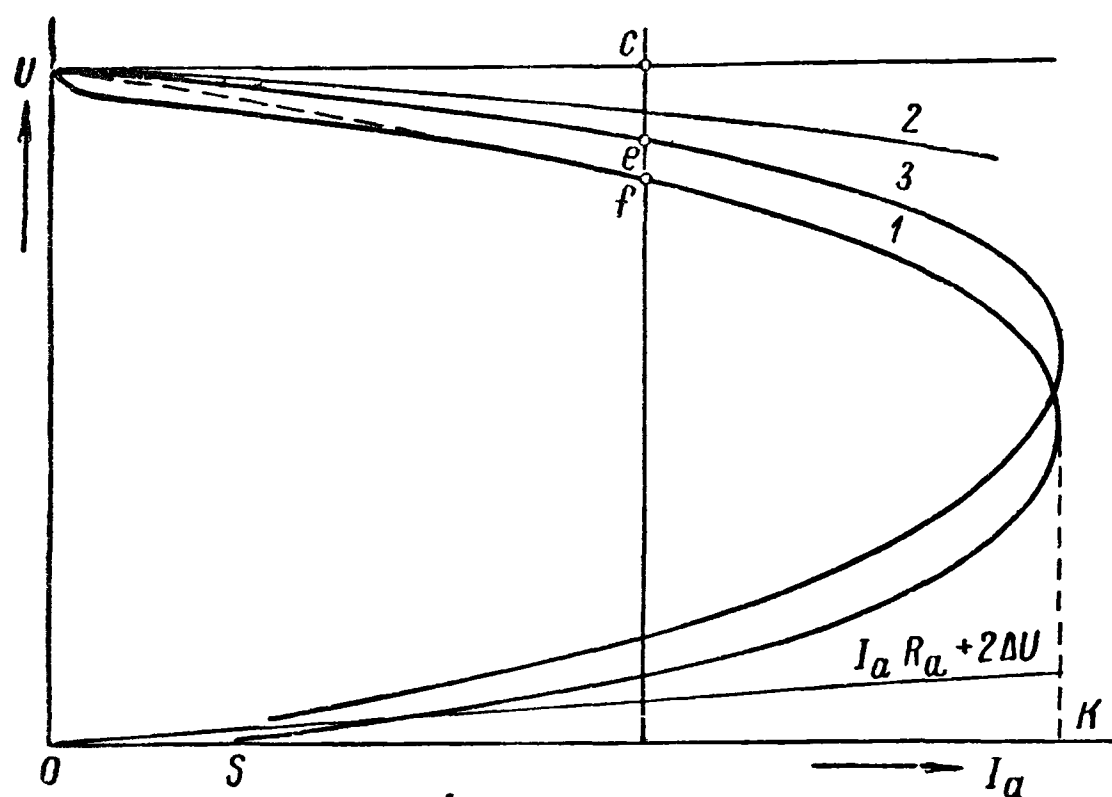
Напомним (§ 166), что внешние нагрузочные характеристики независимо возбуждаемого генератора (фиг. 236) начинаются от одного и того же значения  $i_n$  — начальные точки характеристик лежат на одной и той же вертикали

### 173. Характеристики параллельного генератора постоянного тока при $R_n = \text{const}$

а) Внешняя (рабочая) характеристика параллельного генератора постоянного тока дает зависимость:

$$U = f(I_g) \text{ при } R_n = \text{const}, \quad n = n_N = \text{const}, \quad \beta = \text{const.} \quad (435)$$

При сравнении этой характеристики (фиг. 252, кривая 1) с характеристикой, полученной для того же генератора, но при независимом возбуждении (кривая 2), видим, что она лежит ниже последней. Это и понятно, так как, кроме двух причин, влиявших на падение напряжения независимо возбуждаемого генератора — падение от сопротивлений в цепи якоря и падение от реакции якоря — появляется еще третья — уменьшение тока возбуждения вследствие падения напряжения на обмотке возбуждения, приключенной параллельно к зажимам якоря. При некотором, так называемом критическом значении тока якоря  $I_a = \overline{OK}$  кривая поворачивает в обратную сторону, т. е. при дальнейшем уменьшении внешнего сопротивления ток  $I_g$  не только не возрастает, но начинает убывать и пересекает ось абсцисс в некоторой



Фиг. 252. Внешняя рабочая характеристика параллельного генератора.

точке  $S$ ; если бы генератор не сохранял остаточного магнетизма, то кривая пошла бы в точку  $O$ . При коротком замыкании зажимов параллельного генератора мы приходим к значению тока, равному частному от деления остаточной э. д. с.  $E_c$  на сопротивление обмотки якоря и контакта щеток. В этом случае сказывается также, в некоторой мере, реакция якоря и влияние токов короткозамкнутых секций. Несмотря на малое значение тока установившегося короткого замыкания необходимо отметить, что внезапное короткое замыкание представляет для параллельного генератора безусловную опасность, так как при внезапном коротком замыкании магнитный поток исчезает постепенно и ток якоря достигает большого значения.

Прибавляя к ординатам внешней характеристики отрезки, равные падению напряжения от сопротивлений в обмотке якоря и в контакте щеток, получим внутреннюю характеристику нагрузки <sup>1</sup> (фиг. 252, кривая 3):

$$\left. \begin{aligned} E_b &= f(I_g) \text{ при } R_n = \text{const}, \\ n &= n_N = \text{const}, \quad \beta = \text{const.} \end{aligned} \right\} \quad (436)$$

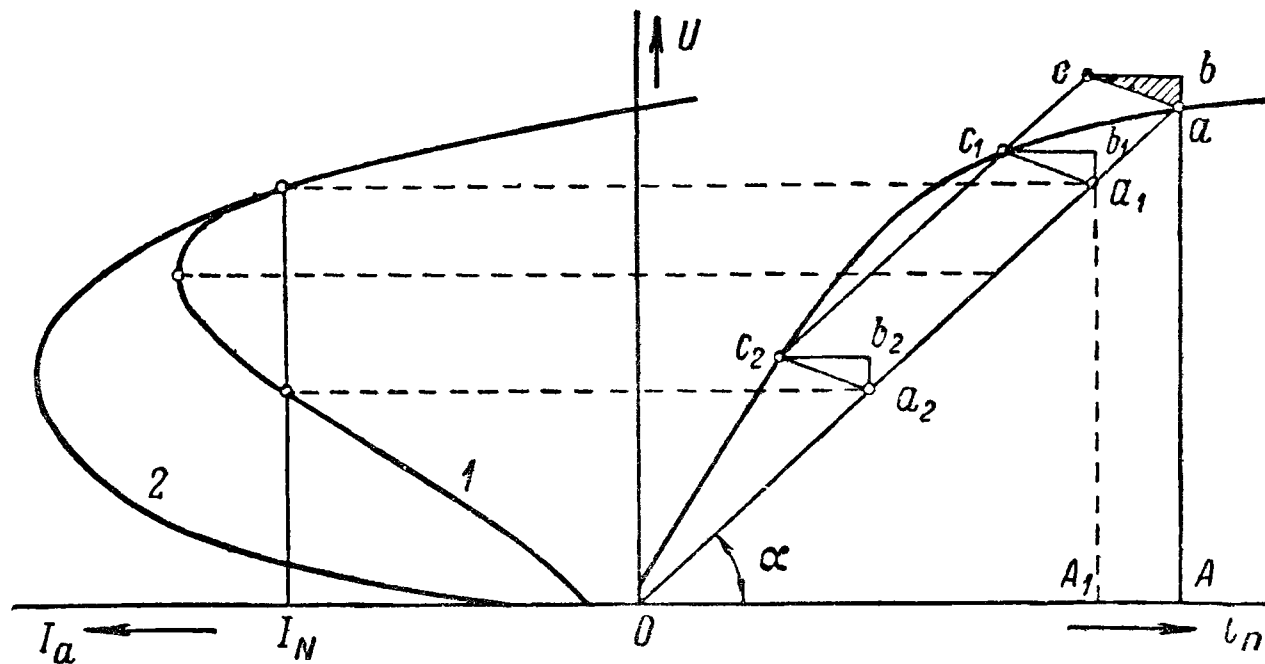
Проведем через какую-нибудь точку внешней характеристики, например 1, вертикаль. Тогда падение напряжения выразится отрезком  $\overline{cf} = \overline{ce} + \overline{ef}$ . Здесь  $\overline{ef}$  представляет падение напряжения от сопротивления якоря и контакта щеток, а  $\overline{ce}$  — падение, вызванное реакцией якоря и уменьшением тока возбуждения  $i_n$ . В связи с тем, что падение напряжения  $I_a R_a + 2\Delta U_B$  не представ-

<sup>1</sup> Не следует смешивать с внутренней нагрузочной характеристикой.

ляет собой прямой, проходящей через начало координат, каковой оно было бы, если бы

$$I_a R_a + 2\Delta U_B = I_a R_\Sigma,$$

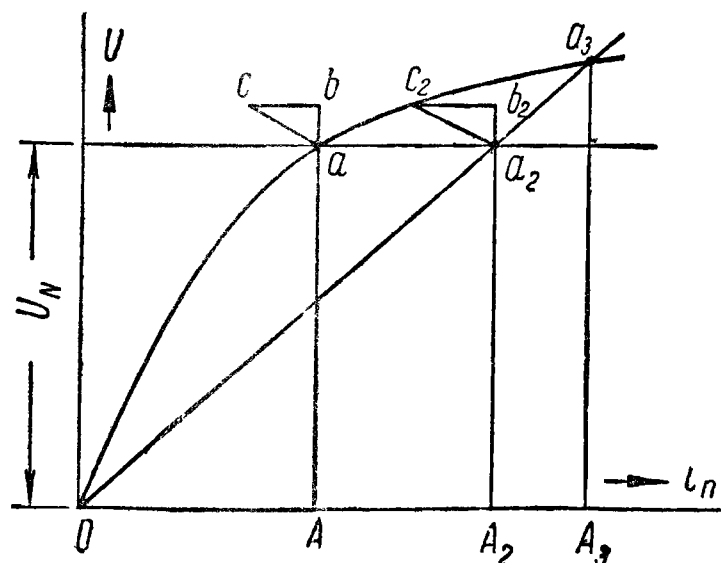
где  $R_\Sigma = R_a + R_B = \text{const}$  (причем  $R_B = 2\Delta U_B / I_a$ ), то вначале напряжение  $U$  резко падает, а потом происходит плавное падение, как уже указывалось при анализе внешней характеристики независимо возбуждаемого генератора.



Фиг. 253. Построение внешней рабочей характеристики параллельного генератора.

ратора. Часто, снимая внешнюю характеристику с некоторого значения  $I_g$ , проводят ее ошибочно, как показано пунктирной кривой, между тем истинный характер ее показан кривой 1.

б) Построение внешней характеристики. Построение можно выполнить по х. г. х. х. и характеристичному треугольнику, определенному для  $I_g = I_N$ , считая, что его стороны пропорциональны току  $I_g$ . Пусть на фиг. 253 точка  $a$  соответствует номинальному напряжению  $U_N$  при холостом ходе ( $I_g = 0$ ). Сопротивление цепи возбуждения  $R_n$  определяется по данным характеристики так:



Фиг. 254. Построение для определения повышения напряжения.

$$R_n = \frac{U_N}{I_n} = \operatorname{tg} \alpha. \quad (437)$$

Так как для внешней характеристики это сопротивление остается (принимается) без изменения, то падение напряжения в функции от  $I_n$  выразится прямой  $\overline{Oa}$ ; однако нас интересует падение напряжения в зависимости от  $I_g$ ; его можно найти следующим образом. Построив у точки  $a$  характеристичный треугольник для  $I_g = I_N$ , проведем через  $C$  линию, параллельную  $\overline{Oa}$ ; она пересечет характеристику холостого хода в двух точках,  $c_1$  и  $c_2$ , как и должно быть, так как выше мы говорили, что внешняя характеристика параллельного генератора не является однозначной функцией тока  $I_g$ . Проведем через  $c_1$  и  $c_2$  параллели к  $\overline{sa}$ , получим точки  $a_1$  и  $a_2$ , расстояния которых от оси абсцисс дадут нам искомые напряжения  $U_1$  и  $U_2$  генератора при нагрузке его до  $I_N$ . Подобным образом можем найти значения напряжения и для других значений  $I_g$ , т. е. построить всю внешнюю характеристику. На фиг. 253 построение выполнено во II квадранте; при построении находим и точку внешней характеристики, соответствующую значению критического тока. При этом токе вершина характеристичного треугольника будет лежать в точке касания х. г. х. х. и прямой, проведенной параллельно к  $\overline{aO}$ .



Построение велось нами в предположении, что ампервитки  $pAW_r = pAW_g + pAW_e$  пропорциональны току  $I_g$ . В действительности при возрастании  $I_g$  ампервитки  $AW_r$  будут расти медленнее из-за постепенного уменьшения  $AW_e$ . Вследствие этого опытная кривая  $U = f(I_g)$  получит перегиб при значении  $I_g$  большем, чем построенная, и пересечет ось абсцисс также и несколько большем  $I_g$  (кривая 2, фиг. 253). В верхних своих частях те кривые, если треугольник  $abc$  был взят из опытной нагрузочной характеристики, снятой для  $I_g = I_N$ , совпадут довольно хорошо.

Если снятие внешних нагрузочных характеристик производилось так, как было указано выше (§ 172, п. «б»), то тогда начальные ординаты их, нанесенные в функции  $I_g$ , будут соответствовать внешней характеристике.

в) Процентное изменение напряжения. Процентное изменение напряжения при номинальном токе определится следующим образом:

$$\xi\% = \frac{\overline{Aa} - \overline{A_1a_1}}{\overline{Aa}} \cdot 100.$$

Процентное повышение напряжения (фиг. 254) при разгрузке от  $I_g' = I_N$  до  $I_g = 0$

$$\varepsilon\% = \frac{\overline{A_3a_3} - \overline{A_2a_2}}{\overline{A_2a_2}} \cdot 100 = \frac{\overline{A_3a_3} - \overline{A_2a_2}}{\overline{Aa}} \cdot 100$$

будет, очевидно, меньше, чем  $\xi\%$ .

#### 174. Характеристики параллельного генератора постоянного тока при $U = \text{const}$

а) Регулировочная характеристика дает зависимость:

$$\left. \begin{aligned} i_n &= f(I_g) \text{ при } U = \text{const}; \\ n &= n_N = \text{const}; \quad \beta = \text{const.} \end{aligned} \right\} \quad (438)$$

Регулировочная характеристика параллельного генератора совпадает практически с таковой же независимо возбуждаемого генератора (фиг. 244).

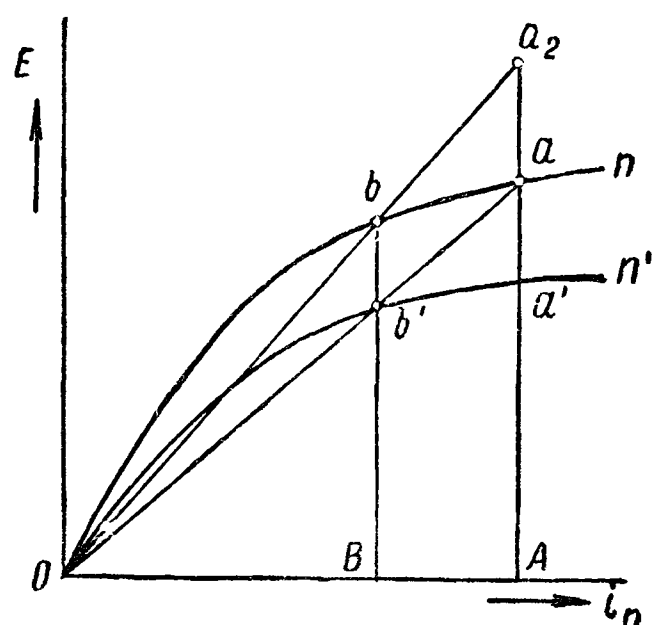
б) Характеристика короткого замыкания. Для параллельного генератора, замкнув зажимы накоротко, мы делаем  $i_n = 0$ , единственная точка характеристики короткого замыкания, которую мы можем брать, это начальная точка от остаточного магнетизма. Для снятия кривой  $i_n = f(I_a)$  при  $U = 0$  необходимо, очевидно, перейти на независимое возбуждение. Этой характеристикой ранее пользовались для получения характеристического треугольника, но так как это дает неверные результаты (§ 166), то снятие ее не представляет интереса.

#### 175. Характеристика холостого хода параллельного генератора постоянного тока при изменяющейся скорости вращения и неизменном сопротивлении цепи возбуждения

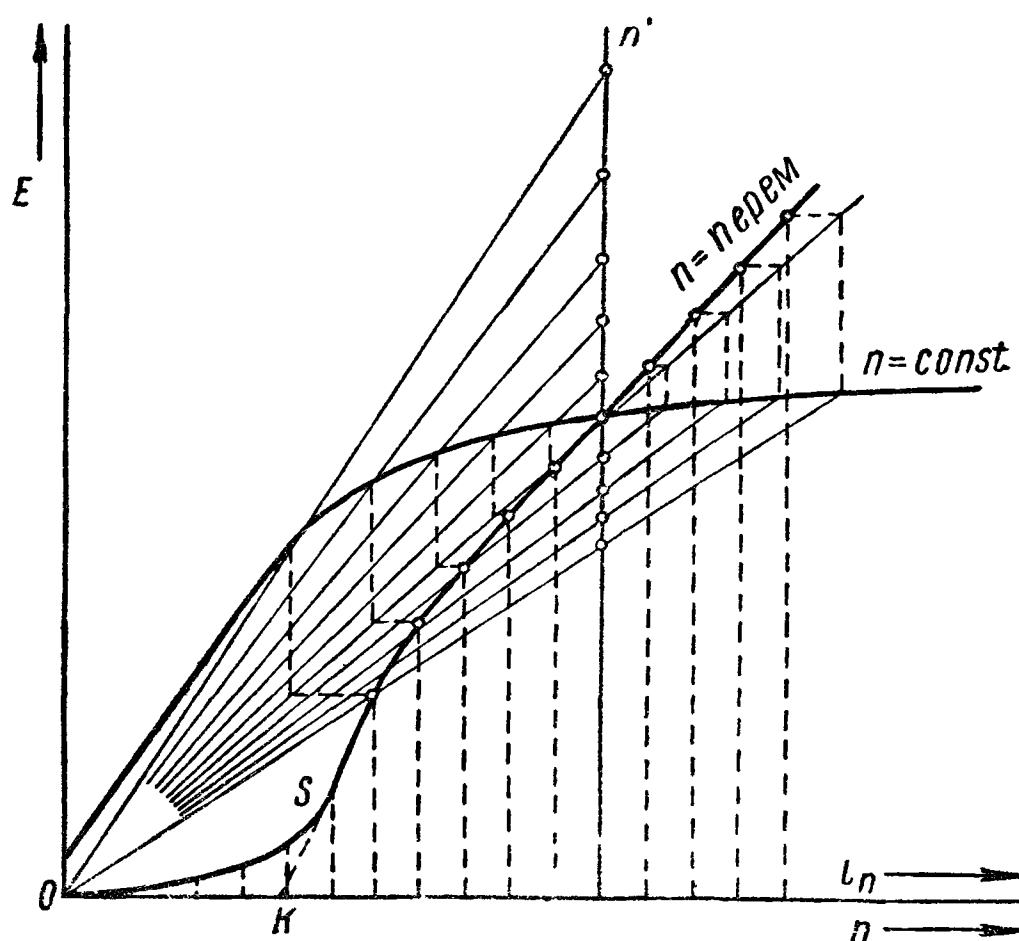
Как мы видели (§ 165), напряжение независимо возбуждаемого генератора меняется при холостом ходе и неизменном сопротивлении цепи возбуждения ( $R_n = \text{const}$ ) прямо пропорционально скорости вращения генератора, так как при этом ток возбуждения остается постоянным. В параллельном генераторе при тех же условиях напряжение изменяется значительно быстрее скорости вращения, так как при  $R_n = \text{const}$  ток возбуждения изменяется пропорционально  $U$ . На фиг. 255 приведены две характеристики холостого хода параллельного генератора, одна — для номинальной скорости вращения  $n_N$ , другая — для пониженной  $n'$ .

При независимом возбуждении характеристики холостого хода будут для тех же скоростей вращения практически совпадать с приведенными на фиг. 255 для параллельного генератора.

Пусть  $\overline{OA}$  — возбуждение при номинальной  $n_N$  скорости вращения, соответствующее номинальному напряжению  $U_N = E_{oN}$ . Если теперь мы снизим скорость вращения до  $n'$ , то при независимом возбуждении напряжение генератора снизится от значения  $\overline{Aa}$  до  $\overline{Aa'}$ . При самовозбуждении и при  $R_n = \text{const}$  напряжение должно падать по прямой  $\overline{Oa}$ ; следовательно, при скорости вращения  $n'$  станет равным  $\overline{Bb'}$ , причем ток возбуждения упадет до значе-



Фиг. 255 Характеристики генераторного холостого хода при двух разных скоростях вращения ( $n$  и  $n'$ )



Фиг. 256 Построение зависимости напряжения параллельного генератора от скорости вращения

ния  $\overline{OB}$ . Продолжив  $\overline{Bb'}$  до пересечения с верхней характеристикой в точке  $b$  и проведя луч  $\overline{Oba_2}$ , можем написать:

$$\frac{\overline{Bb'}}{\overline{Bb}} = \frac{\overline{Aa}}{\overline{Aa_2}} = \frac{n'}{n} \quad (439)$$

или

$$\overline{Bb'} = \overline{Bb} \frac{n'}{n}, \quad \overline{Aa_2} = \overline{Aa} \frac{n}{n'}. \quad (440)$$

Отсюда следует, что точку  $b'$  мы можем получить, не строя характеристики для  $n'$ . Подсчитав по (440) длину отрезка  $\overline{Aa_2}$ , соединяем  $a_2$  с  $O$  и из точки  $b$  пересечения луча  $\overline{Oa_2}$  с характеристикой холостого хода для  $n_N$  опускаем перпендикуляр  $\overline{bB}$ ; пересечение его с лучом  $\overline{Oa}$ , точка  $b'$ , и даст нам искомое напряжение. Взяв ряд значений для  $n$  и проделав только что указанные вычисления и построения; получаем соответствующий ряд для  $E$ . Значения  $E$  можем нанести в тех же координатах в функции от скорости вращения, откладывая ее на оси абсцисс; тогда получим кривую  $U \approx E = f(n)$ , построенную на фиг. 256.

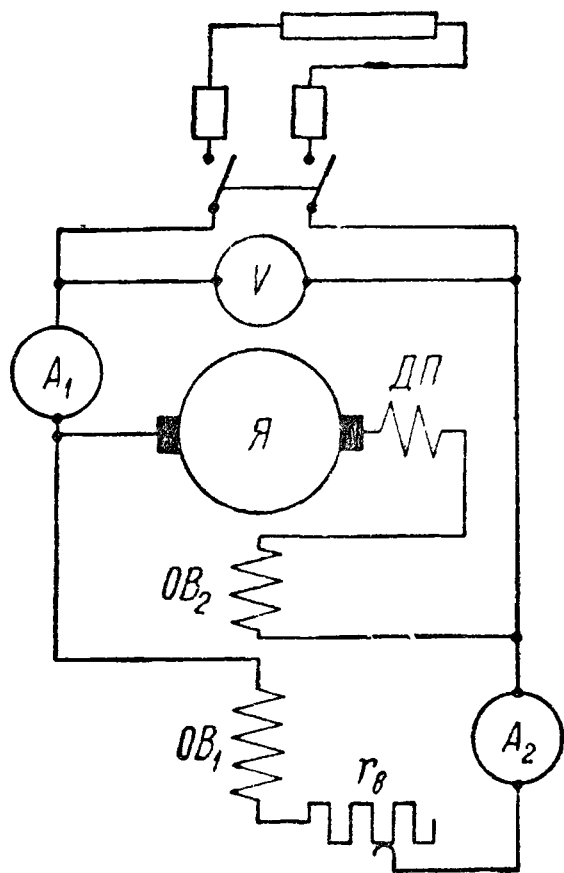
Если бы у генератора не было остаточного магнетизма, то кривая, начиная, примерно, с точки  $S$ , пошла бы по пунктирной линии и пересекла бы ось абсцисс в точке  $K$ . Соответствующая этой точке по масштабу скорость вращения  $n_0$  называется критической скоростью вращения параллельного генератора, так как при этой скорости вращения генератор перестает давать напряжение. При наличии же остаточного напряжения кривая дает перегиб и приходит постепенно к нулю. Критическая скорость вращения  $n_0$  тем больше, чем больше сопротивление цепи возбуждения  $R_n$ .

## Г. ХАРАКТЕРИСТИКИ СМЕШАННОГО ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА

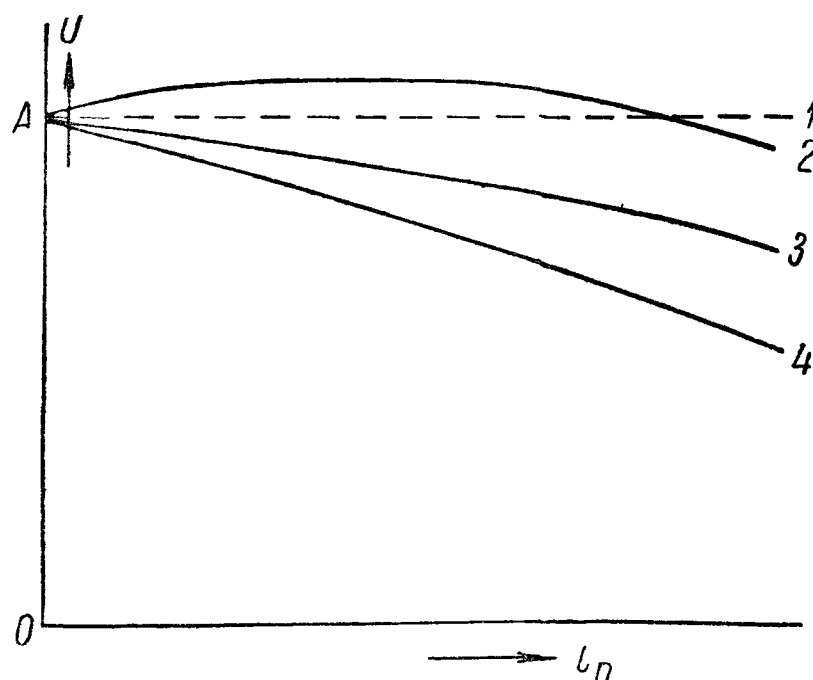
## 176. Общие замечания

а) Согласно-смешанный генератор (фиг. 257) постоянного тока является, по существу, самовозбуждающимся параллельным генератором, в котором для компенсации падения напряжения при нагрузке добавлена последовательная обмотка возбуждения, рассчитанная соответствующим образом.

Если бы подобная компенсация могла быть осуществлена при всех нагрузках согласно-смешанного генератора, то внешняя, рабочая характеристика его была бы прямой линией (фиг. 258, прямая 1). В действительности, как убедимся в дальнейшем, такая строгая компенсация падения напряжения при всех нагрузках невозможна; поэтому приходится удовлетворяться практически полной



Фиг. 257 Схема соединений для исследования смешанного генератора



Фиг. 258 Внешняя рабочая характеристика (2) согласно-смешанного генератора, то же параллельного генератора (3) и встречно-смешанного генератора (4)

компенсацией падения напряжения согласно-смешанного генератора (фиг. 258, кривая 2). Вследствие этого для согласно-смешанного генератора теряет практический смысл регулировочная характеристика (при  $U = \text{const}$ ), и мы получаем только две серии характеристик:

- 1) характеристики при неизменном токе нагрузки,  $I_g = \text{const}$ ;
- 2) характеристики при неизменном сопротивлении цепи возбуждения,  $R_n = \text{const}$ .

б) Встречно-смешанный генератор постоянного тока представляет собой параллельный генератор постоянного тока с увеличенным падением напряжения, которое получается добавлением встречно включенной последовательной возбуждающей обмотки. У такого генератора горизонтальный катет характеристического треугольника будет состоять, кроме продольно действующих размагничивающих ампервитков якоря  $pAW_g$  и размагничивающей составляющей  $pAW_e$  от поперечно действующих ампервитков якоря, еще из размагничивающих ампервитков встречно включенной последовательной обмотки возбуждения  $pAW_s$ . Вследствие этого добавочного размагничивания генератора при нагрузке внешняя характеристика встречно-смешанного генератора будет более падающей (фиг. 258, кривая 4), чем обычного параллельного генератора (фиг. 258, кривая 3). По этой причине мы можем ограничиться рассмотрением только согласно-смешанного генератора.

в) Как согласно-смешанный, так и встречно-смешанный генератор можно осуществить с коротким или с длинным ответвлением (шунтом) (гл. I, § 22,

п. «а»). При коротком ответвлении ток  $I_s$ , проходящий по последовательной обмотке возбуждения, равен току нагрузки  $I_g$ , а поэтому можем написать (фиг. 17, а):

$$I_s = I_g = I_a - i_n, \quad (441)$$

где  $I_a$  — ток в обмотке якоря,  $i_n$  — ток в обмотке возбуждения.

Обозначая попрежнему напряжение на зажимах якоря через  $U$ , сопротивление якоря, включая щетки, через  $R_\Sigma$ , а сопротивление последовательной обмотки через  $R_s$ , можем написать для короткого ответвления:

$$E_g = U + I_g R_s + I_a R_\Sigma = U + I_a (R_s + R_\Sigma) - i_n R_s. \quad (442)$$

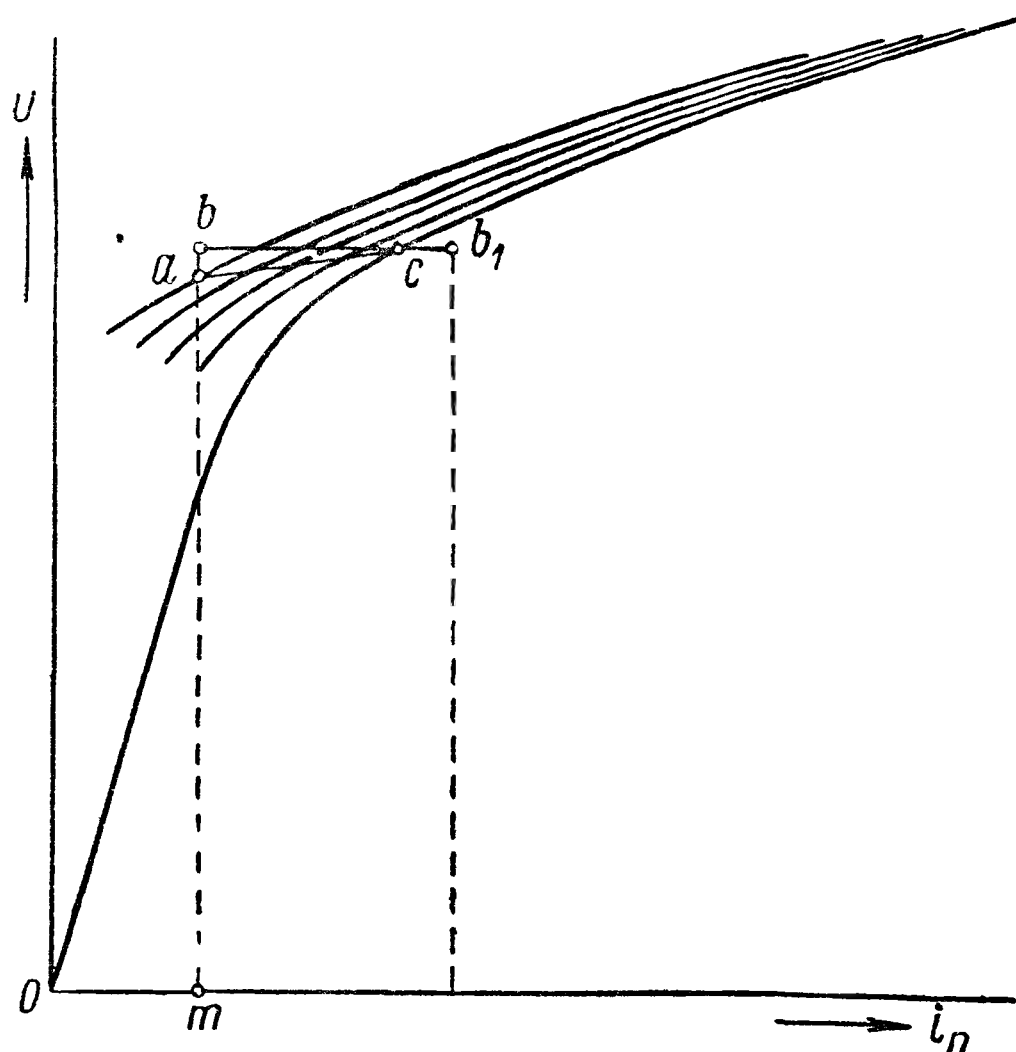
При длинном ответвлении имеем (фиг. 17, б):

$$I_s = I_g = I_g + i_n, \quad (443)$$

а потому для него можно написать:

$$E_g = U + I_a (R_s + R_\Sigma) + i_n R_s. \quad (444)$$

Из выражений (442) и (444) следует, что с принципиальной точки зрения преимущество на стороне короткого ответвления, так как при одном и том же  $U$  требуется меньшая э. д. с.  $E_g$ , практически же, вследствие малости значения  $i_n R_s$ , это особого значения не имеет. Обычно параллельная обмотка присоединяется не на зажимы якоря, а непосредственно на зажимы машины (длинный шунт).



Фиг. 259 Внешние нагрузочные характеристики согласно-смешанного генератора.

### 177. Характеристики согласно-смешанного генератора постоянного тока при $I_g = \text{const}$

а) Характеристика холостого хода согласно-смешанного генератора совпадает с характеристикой холостого хода параллельного генератора, так как при снятии ее ток нагрузки и последовательная обмотка возбуждения никакой роли не играют.

б) Нагрузочные характеристики. Снятие внешних нагрузочных характеристик

согласно-смешанного генератора производится так же, как и в случае параллельного генератора. Пусть на фиг. 259 нижняя кривая — х. г. х. х., а верхняя кривая — внешняя нагрузочная характеристика для  $I_g = I_N$ . Пусть точка  $a$  соответствует номинальному напряжению генератора при холостом ходе. Вычислив по  $I_g$  величину  $pAW_r = pAW_g + pAW_e$  — ампервитки реакции якоря — и отложив их, как и в случае параллельного генератора, вправо от точки  $c$ , получим отрезок  $\overline{cb_1} = \frac{pAW_r}{w_n}$ , где  $w_n$  — число витков параллельной обмотки возбуждения.

Если  $w_s$  — число витков последовательной обмотки возбуждения, то при токе  $I_g = I_N$  она создаст  $w_s I_g = pAW_s$  ампервитков, противодействующих ампервиткам реакции якоря, а поэтому отрезок, равный  $w_s I_g$ , мы должны





Отложив затем отрезок

$$\overline{CD} = \frac{pAW_r}{w_n},$$

получим созданные при нагрузке намагничивающие ампервитки:

$$\overline{BD} = \overline{OA} = \frac{p(AW_s - AW_r)}{w_n}.$$

В предположении, что эти ампервитки остаются пропорциональными току  $I_g$ , получаем прямую результирующих ампервитков  $\overline{OD}$ . Опустив из  $D$  перпендикуляр  $\overline{DA}$ , проводим линию  $\overline{AF} \parallel \overline{Oa_0}$ . При наличии в генераторе намагничивающих ампервитков  $\overline{OA}$ , создаваемых последовательной обмоткой возбуждения, напряжение на зажимах машины должно изменяться по прямой  $\overline{AF}$ , так как сопротивление цепи параллельной обмотки остается неизменным. Вычислив падение напряжения в якоре и в контакте щеток, откладываем его от точки  $A$  по вертикали:

$$\overline{Ac} = I_N(R_\Sigma + R_s).$$

Через  $c$  проводим  $\overline{cb} \parallel \overline{AF}$ , а из  $b$  опускаем перпендикуляр  $\overline{ba}$  до пересечения с прямой  $\overline{AF}$ . Ордината  $\overline{aG}$  и будет соответствовать искомой внешней характеристике согласно-смешанного генератора при токе  $I_N$ . Последняя построена на фиг. 260 в левом квадранте. Для того чтобы найти напряжение в питательном пункте, например, расположенном на некотором расстоянии от генератора, вычитаем из  $\overline{Ga}$  отрезок  $\overline{ad} = I_N R_f$ , где  $R_f$  — сопротивление проводов. Кривая изменения напряжения в питательном пункте  $U_f = f(I_g)$  построена также в левом квадранте.

#### Д. ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ САМОВОЗБУЖДЕНИЕ И НЕЗАВИСИМОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

##### 179. Внешние условия, необходимые для самовозбуждения параллельного генератора постоянного тока

а) Самовозбуждение параллельного генератора постоянного тока происходит за счет остаточного магнетизма и возможно только при соответствующем соединении его возбуждающей обмотки и обмотки якоря, как следует из дальнейшего рассмотрения этого вопроса.

На фиг. 261 представлен двухполюсный параллельный генератор постоянного тока с правой параллельной обмоткой. При указанном на фигуре правом вращении и указанной полярности остаточного магнетизма (верхний полюс — северный, нижний — южный) нижняя щетка будет положительной, верхняя — отрицательной. Для осуществления параллельного самовозбуждения необходимо, при указанном на фигуре направлении обмотки возбуждения, присоединить концы  $A$  и  $B$  этой обмотки, соответственно,  $A$  — к отрицательной (—) и  $B$  — к положительной (+) щеткам. При этом ток в обмотке возбуждения будет иметь такое направление, что магнитный поток полюсов будет увеличиваться. Вращаясь в увеличенном потоке, обмотка якоря будет давать большую э. д. с., вследствие чего возрастает ток в обмотке возбуждения и т. д. до тех пор, пока не установится некоторая конечная э. д. с., о чем речь будет дальше (§ 180).

Если бы мы взяли вместо правой (параллельной) якорной обмотки левую, то при том же правом вращении полярности щеток были бы обратными. Тогда, при сохранении того же характера намотки обмотки полюсов и того же соединения ее концов со щетками, направление тока в обмотке возбуждения

было бы обратным, и он не увеличивал бы магнитный поток полюсов, а уменьшал его, т. е. нарушилось бы условие, необходимое для самовозбуждения генератора.

Точно так же, если бы мы взяли на фиг. 261 другое направление намотки возбуждающей обмотки при сохранении прочих условий неизменными, то самовозбуждение оказалось бы опять невозможным.

Невозможным окажется самовозбуждение генератора и в том случае, если мы изменим на фиг. 261 направление вращения, так как при этом изменится полярность щеток, а следовательно, и направление тока в обмотке возбуждения.

Таким образом, при данном остаточном магнетизме (фиг. 261) самовозбуждение генератора возможно только в том случае, если надлежащим образом согласованы друг с другом следующие четыре условия:

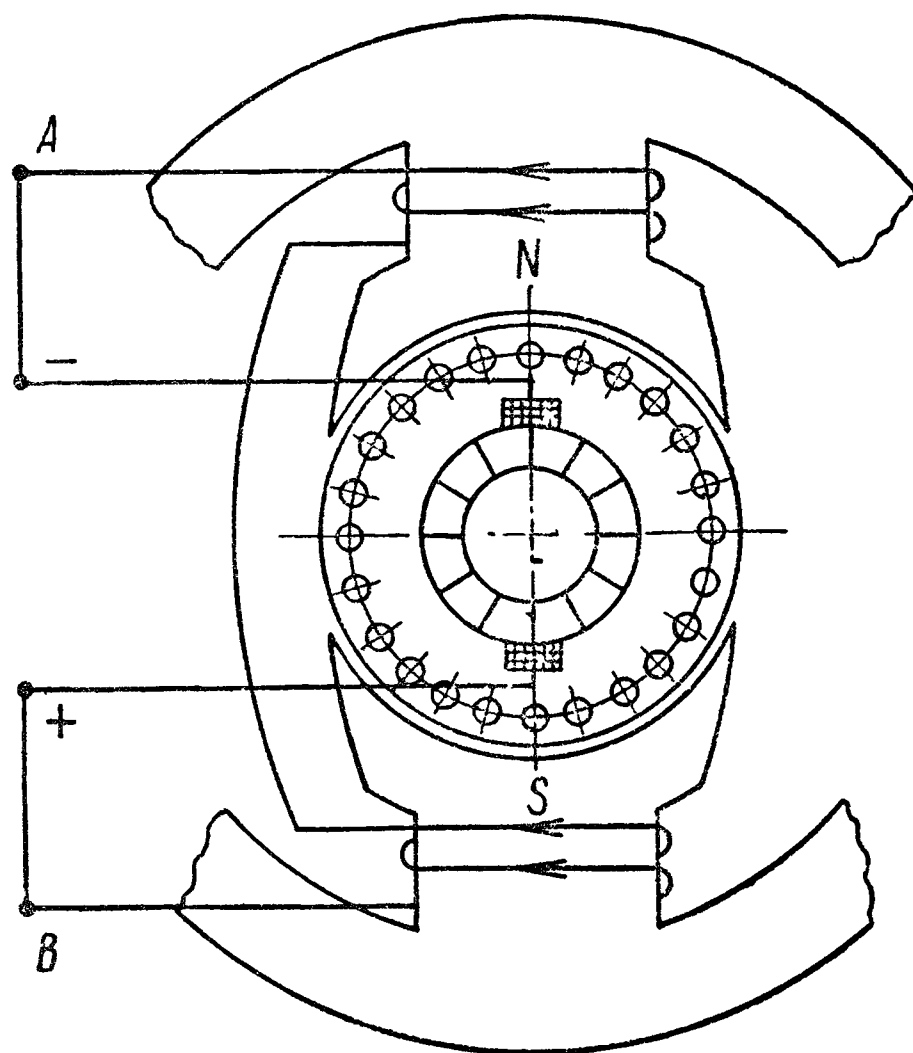
- 1) направление вращения якоря (правое и левое);
- 2) направление намотки обмотки якоря (правая или левая обмотка),
- 3) направление намотки обмотки возбуждения (правое или левое),
- 4) взаимосоединение концов возбуждающей и якорной обмоток

Нарушение одного (любого) из этих четырех условий делает самовозбуждение генератора невозможным, а нарушение двух — восстанавливает условия самовозбуждения. Очевидно, что нарушение трех из четырех согласованных условий опять влечет невозможность самовозбуждения, а нарушение всех четырех условий — восстанавливает возможность самовозбуждения

б) Мы рассматривали условия самовозбуждения параллельного генератора при заданном направлении остаточного магнетизма. Спрашивается. возможно ли самовозбуждение параллельного генератора, представленного на фиг. 261, если бы в силу тех или иных причин произошло изменение направления остаточного магнетизма.<sup>1</sup> Нетрудно убедиться, что в таком случае все обошлось бы благополучно, и параллельный генератор самовозбудился бы, однако — при измененных полярностях щеток генератора, что на практике в большинстве случаев недопустимо.

То, что условия самовозбуждения при изменении остаточного магнетизма сохраняются, следует из следующих рассуждений. Вследствие изменения направления остаточного магнетизма полярности щеток генератора при прежнем направлении вращения и прежней правой якорной обмотке изменятся на обратные, вследствие чего изменится на обратное и направление тока в обмотке возбуждения, что как раз и требуется. Таким образом, можем сказать, что параллельные генераторы, в которых выполнены вышеприведенные четыре условия — согласованы направления вращения, направления намоток якорной и возбуждающей обмотки и произведено правильное соединение этих обмоток — могут самовозбудиться независимо от направления остаточного магнетизма, от которого зависит только полярность щеток.

Но, с другой стороны, из сказанного следует, что если по какой-либо причине произойдет изменение направления остаточного магнетизма, то для



Фиг. 261. Иллюстрация к выяснению внешних условий самовозбуждения параллельного генератора.

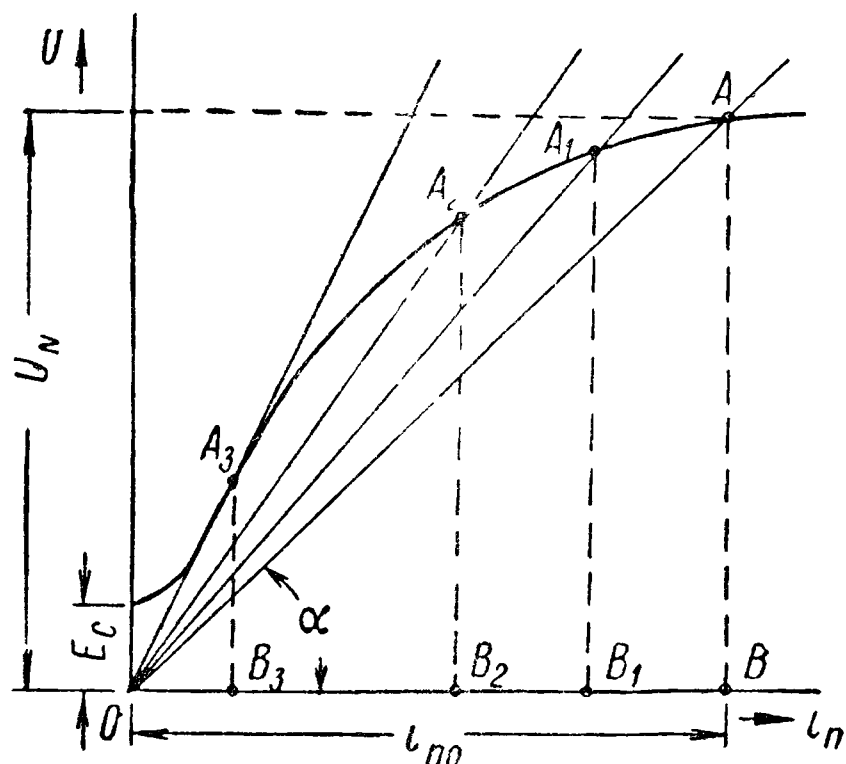
<sup>1</sup> Такое перемагничивание случается иногда на практике (§ 181)

возвращения щеткам их прежней полярности необходимо переманитить полюсы током от постороннего источника.

Наши рассуждения мы вели применительно к параллельному генератору, но нетрудно убедиться, что они остаются в силе как для последовательного генератора, так и для генератора смешанного возбуждения.

#### 180. Внутренние условия, необходимые для самовозбуждения параллельного генератора постоянного тока

Для возникновения процесса самовозбуждения параллельного генератора постоянного тока недостаточно выполнения только что рассмотренных условий, названных нами внешними условиями самовозбуждения. Необходимо еще,



Фиг 262 Пересечение характеристики генераторного холостого хода с прямой  $I_n R_n$

чтобы были выполнены условия, которые можно назвать внутренними, так как они определяются параметрами генератора

Рассмотрим восходящую ветвь х. г. х. х. параллельного генератора, так как при самовозбуждении генератора она играет важную роль (фиг 262). Эта ветвь в своем начале имеет небольшой слегка вогнутый участок, начинающийся с э. д. с. остаточного магнетизма  $E_c$ , который затем переходит в прямую, а последняя начинает затем загибаться вправо. При небольшой величине  $E_c$  продолжение прямолинейного участка характеристики в сторону оси абсцисс может пересечь последнюю в начале координат, — точка  $O$  (фиг. 262).

Пусть точка  $A$  соответствует номинальному напряжению генератора при холостом ходе  $\overline{AB} = E_{oN} = U_N$ . Тогда прямая  $OA$  представляет собой так называемую линию сопротивления цепи возбуждения для номинального напряжения. Действительно, из треугольника  $OAB$  имеем

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\overline{AB}}{\overline{OB}} = \frac{U_N}{I_{n0}} = R_n,$$

а следовательно, линия  $OA$  дает  $I_n R_n = u$  в функции от  $I_n$ , т. е. зависимость напряжения  $u$  на зажимах цепи возбуждения от тока возбуждения  $I_n$ . При соблюдении вышеуказанных внешних условий самовозбуждения (§ 179) и установке в цепи возбуждения сопротивления  $R_n$ , приключив цепь возбуждения к зажимам якоря, мы получим на зажимах якоря по завершении процесса самовозбуждения напряжение  $U_N$ .

На фиг 262 проведен ряд линий  $OA_1, OA_2, OA_3, \dots$  под разными углами к оси абсцисс, соответствующими другим значениям сопротивления цепи возбуждения. Линиям  $OA_1, OA_2$ , пересекающим характеристику в точках  $A_1$  и  $A_2$ , соответствуют сопротивления цепи возбуждения, при которых генератор возбуждается до напряжения  $\overline{A_1B_1}, \overline{A_2B_2}$ . Линия  $OA_3$ , совпадающей с прямолинейной частью х. г. х. х., соответствует так называемое критическое сопротивление цепи возбуждения. Точки х. г. х. х., совпадающие с  $OA_3$ , дают неустойчивые магнитные состояния машины. При малейшем возрастании скорости вращения  $n$  или уменьшении сопротивления  $R_n$  напряжение генератора сразу возрастает до начала загиба характеристики, наоборот, при малейшем уменьшении  $n$  или увеличении  $R_n$  напряжение генератора падает почти до нуля.

Из этого ясно, что для значений сопротивления  $R_n$ , превышающих тангенс угла наклона прямолинейной части восходящей ветви х. г. х. х., линия сопротивления будет пересекать характеристику в точке, столь близкой от значения  $E_c$ , что о самовозбуждении не приходится говорить.

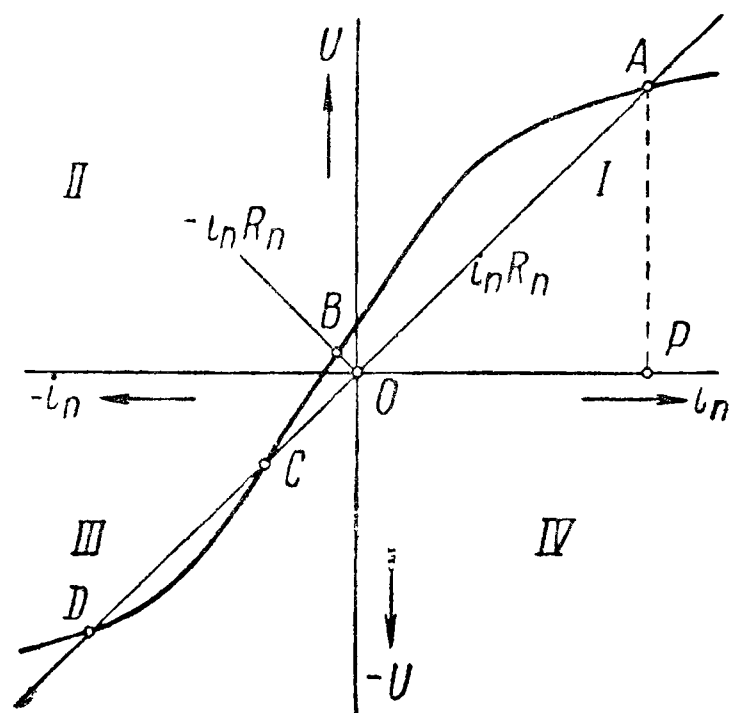
В предыдущих рассуждениях мы считали, что при снятии х. г. х. х. параллельного генератора напряжение на его зажимах  $U$  практически равно индуцируемой в якоре э. д. с.  $E$ , так как вследствие малости тока возбуждения вызываемые им падения напряжения как от реакции якоря, так и от сопротивления якоря и контакта щеток крайне незначительны. Вследствие этого, проводя на фиг. 262 линии сопротивления  $\overline{OA}$ , мы учитывали в  $R_n$  только сопротивление обмотки возбуждения и соответствующего регулировочного реостата (фиг. 257)  $R_n = r_n + r_b$ . На практике, однако, часто, в особенности у небольших по мощности машин, случается, что, вследствие загрязнения коллектора или выступания слюдяных прослоек между коллекторными пластинами, начальное сопротивление контакта щеток достигает такой величины, что машина не возбуждается. Обыкновенно в этих случаях для получения самовозбуждения достаточно бывает кратковременного дополнительного нажима щеток вручную, что следует делать с соответствующей предосторожностью, чтобы после внезапного быстрого самовозбуждения генератора не попасть под напряжение.

Мы рассматривали параллельный генератор постоянного тока, но все наши рассуждения приложимы и к другим двум типам самовозбуждающихся генераторов постоянного тока — последовательному и смешанного возбуждения.

#### 181. Явления саморазмагничения и перемагничения параллельного генератора постоянного тока

На фиг. 263 представлена нисходящая ветвь характеристики холостого хода параллельного генератора, возбужденного до напряжения  $\overline{AP}$ , и продолжение нисходящей ветви в III квадранте. При том же сопротивлении цепи возбуждения, но неправильном присоединении ее концов к зажимам якоря мы получим на характеристике точку  $B$ . Эта точка, так же как и точка  $A$ , является устойчивой, так как при уменьшении отрицательного тока ( $-i_n$ ) напряжение растет, и наоборот. Продолжение линии сопротивления  $\overline{OA}$  в сторону третьего квадранта дает еще два пересечения кривой  $U = f(i_n)$ , а именно точки  $C$  и  $D$ . Если при посредстве постороннего воздействия генератор намагнитится до точки  $C$ , то он сам намагнитится до точки  $D$ , которая будет устойчивой. Таким образом, точка  $C$  неустойчивая, так как  $U$  при возрастающем (или убывающем)  $i_n$  растет (или падает) быстрее, чем  $i_n R_n$ .

Посторонним воздействием, переводящим намагничивание машины на ветвь третьего квадранта, могут явиться, при некоторых условиях, продольно действующие ампервитки якоря. В самом деле, если генератор не имеет добавочных полюсов и щетки сдвинуты с геометрической нейтрали в надлежащую сторону (по вращению), то обмотка создаст некоторое количество продольно действующих ампервитков, которые будут ослаблять основное поле, создаваемое обмоткой возбуждения. Если внешняя цепь, питаемая генератором, обладает большой самоиндукцией, то может оказаться, что при быстром уменьшении тока в обмотке возбуждения ток якоря будет



Фиг. 263. Иллюстрация к условиям саморазмагничения и перемагничения параллельного генератора.



убывать медленнее. Если это замедление будет таково, что результирующая ампервитки переменят свой знак, то генератор либо размагнитится, либо намагнитится в другом направлении, т. е. перемагнитится.

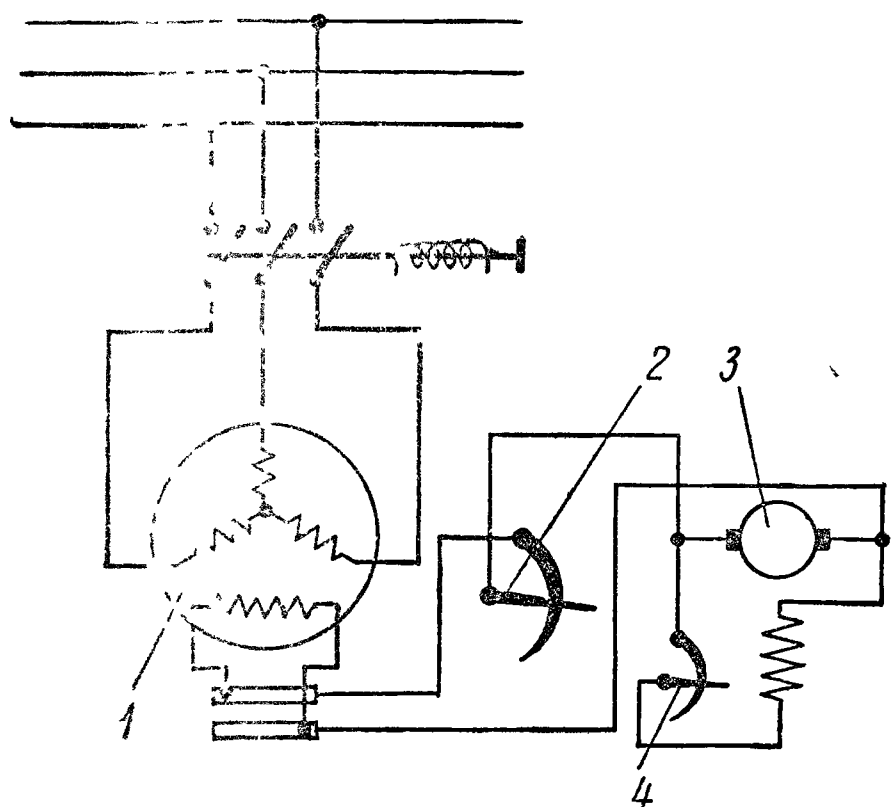
Эти же явления могут иметь место и в генераторе с добавочными полюсами, если щетки сдвинуты с геометрической магнитной нейтрали (на которой они в этом случае должны стоять), так как тогда добавочные полюсы создают размагничивание (гл. V, § 116, п. «б»).

Явления перемагничивания параллельных генераторов без добавочных полюсов, работавших в качестве возбuditелей синхронных машин, часто наблюдались раньше, так как внешняя по отношению к возбuditелю цепь — обмотка возбуждения синхронного генератора — обладает большой самоиндукцией. Перемагничивание машины случалось тогда при внезапных коротких замыканиях.

В настоящее время при возбuditелях с добавочными полюсами и при щетках, правильно установленных на магнитной нейтрали, т. е. когда продольно действующая реакция якоря отсутствует, это явление не встречается.

## 182. Магнитоустойчивый параллельный генератор постоянного тока

При применении параллельного генератора постоянного тока в качестве возбuditеля синхронной машины остро встает вопрос о магнитной устойчивости его  $x. г. x. x$ , так как при напряжении, равном, примерно, половине номинального, мы попадаем на прямолинейную часть  $x. г. x. x$ , т. е. на неустойчивую ее часть. Раньше вопрос решался примитивно просто. параллельный возбuditель заставляли работать при его устойчивом номинальном напряжении при всех требуемых от него токах, а регулировку тока, идущего на возбуждение синхронной машины или машины постоянного тока, осуществляли реостатом, включенным в цепь якоря возбuditеля. Такой реостат получил название магнитного регулятора (фиг. 264). Не говоря уже об экономической стороне вопроса (потеря энергии в магнитном регуляторе), такой способ стал совершенно непригодным при росте мощности синхронных машин вследствие громоздкости и дороговизны магнитных регуляторов на большие токи и трудностей с их охлаждением.



Фиг. 264. Схема соединений параллельного генератора с магнитным регулятором.

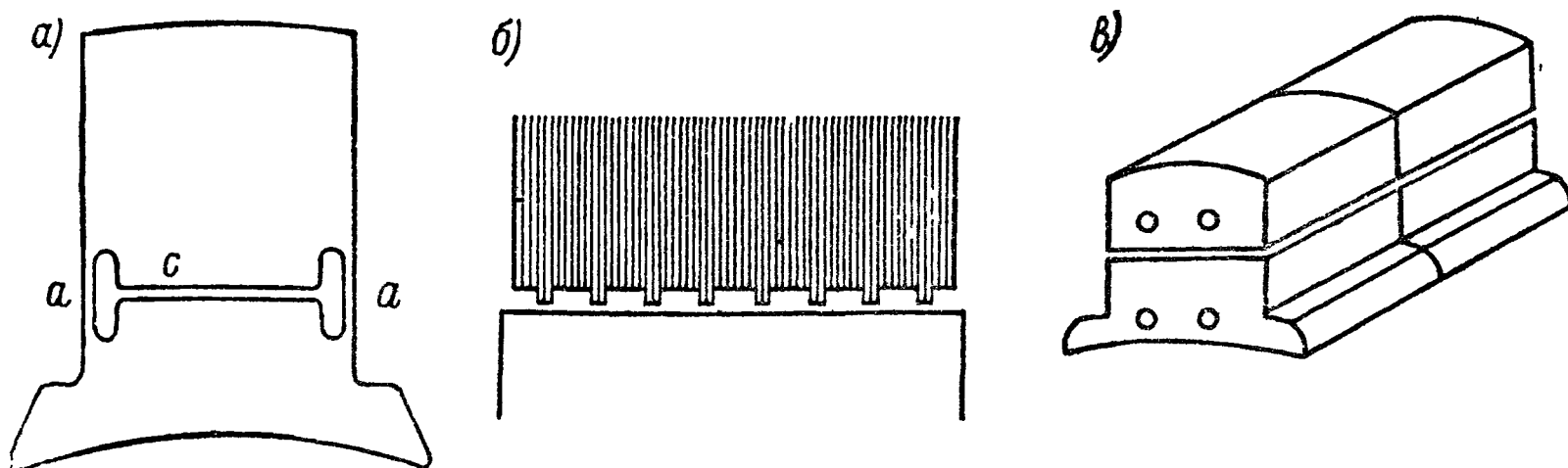
1 — синхронная машина, 2 — магнитный регулятор, 3 — возбuditель, 4 — шунтовой регулятор.

Тогда возник вопрос о придании  $x. г. x. x$  магнитной устойчивости по возможности на всем ее протяжении, чтобы можно было обойтись без магнитного регулятора. Вопрос получил два решения.

а) Первый способ состоит в устройстве в сердечниках полюсов возбuditелей быстро насыщающихся участков путем уменьшения площади сечения сердечника на небольшой длине сердечника. На фиг. 265 показаны некоторые из таких конструкций. При малых токах возбуждения поток идет, главным образом, через узкие перешейки  $a$  (фиг. 265,  $a$ ) и вызывает вследствие насыщения их заметный загиб уже в нижней части  $x. г. x. x$ . При возрастании тока возбуждения проводимость перешейков падает и поток начинает идти через статор  $c$ , но при этом начинает сказываться магнитное сопротивление других участков магнитной цепи машины. Тех же результатов можно достигнуть при помощи конструкций, показанных на фиг. 265,  $b$  и 265,  $в$ . В са-



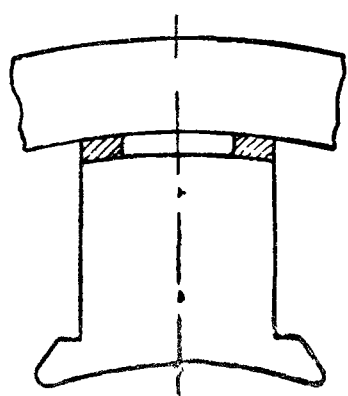
мом деле, на фиг. 265, б часть листов сердечника выступает в зазор машины. Эти выступы насыщаются уже при малых токах возбуждения и играют поэтому ту же роль, что и перешейки в конструкциях фиг. 265, а. На фиг. 265, в представлена конструкция завода «Электросила». Часть листов сердечника



Фиг. 265 Конструкции главных полюсов для создания магнитоустойчивого генератора.

сплошная, прочие же имеют разрез с воздушным промежутком. Очевидно, что эта конструкция будет работать, как и прочие, показанные на фиг. 265.

б) Второй способ придания х. г. х. х. магнитной устойчивости стал возможным после того, как были изобретены магнитные стали с большой коэрцитивной силой. Способ состоит в том, что под основания полюсов кладутся небольшие по размерам прокладки из такой стали (фиг. 266).



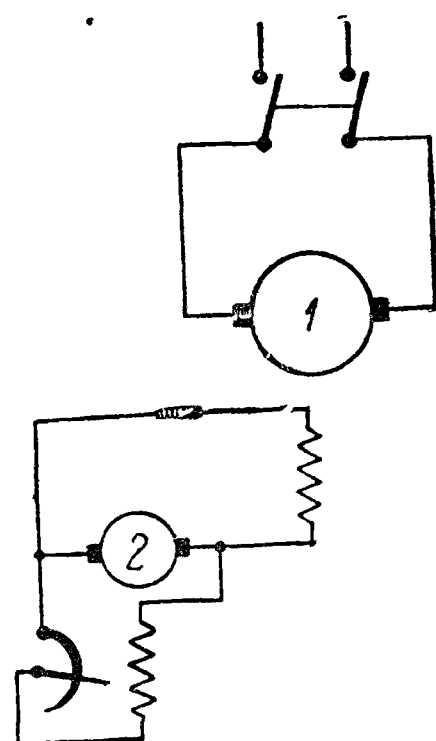
Фиг. 266. Главные полюсы магнитоустойчивого генератора с магнитными прокладками.

В этом случае остаточный магнитный поток создается не только коэрцитивной силой ферромагнитных материалов обычной магнитной цепи, но еще и большой коэрцитивной силой магнитных прокладок, вследствие чего остаточная э. д. с.  $E_c$  значительно возрастает, и не может быть таких условий, как в обычном параллельном генераторе, когда продолжение прямолинейной части х. г. х. х. проходит через начало координат — она всегда пройдет выше, а потому неустойчивой части у х. г. х. х. не будет.

### 183. О возбудителях постоянного тока с независимым возбуждением

В генераторе постоянного тока, предназначенном служить возбудителем синхронной машины переменного тока или независимо возбуждаемой машины постоянного тока, иногда возбуждение возбудителя делают от вспомогательного генератора постоянного тока, вал которого соединяется либо жестко, либо при помощи эластичной муфты с валом возбудителя. В этом случае вспомогательный генератор постоянного тока носит название подвозбудителя, или вспомогательного возбудителя, а возбудитель (чтобы не было смешения) называют главным возбудителем (фиг. 267).

В главном возбудителе с независимым возбуждением вопроса о неустойчивости х. г. х. х. естественно не существует. Также отпадает вопрос о магнитном регуляторе на большую силу тока. Главный возбудитель получает нормальную конструкцию параллельного генератора постоянного тока, к зажимам которого без всяких реостатов приключается цепь возбуждения возбуждаемой машины. Регулировку тока в цепи якоря возбудителя, т. е. в цепи возбуждения возбуждаемой машины, можно осуществить реостатом в цепи якоря подвозбудителя, а так как



Фиг. 267. Возбудитель постоянного тока (1) с подвозбудителем (2)

мощность подвозбудителя составляет всего несколько процентов от мощности главного возбудителя, то величина регулируемого тока, а следовательно, размеры необходимого реостата значительно уменьшаются.

Так, в старом синхронном гидрогенераторе мощностью 77500 *кв*а при  $\cos \varphi = 0,8$  для Днепровской гидростанции<sup>1</sup> главный возбудитель имел мощность 500 *квт*, напряжение 250 *в*, ток 2000 *а*, а согласно-смешанный подвозбудитель — мощность 4 *квт*, напряжение 250 *в*, ток 16 *а*. Таким образом, регулирование тока возбуждения синхронного генератора (до 2000 *а*) осуществлялось регулированием тока якоря подвозбудителя, равного всего 16 *а*, т. е. тока возбуждения главного возбудителя.

#### 184. Рабочие характеристики возбудителей постоянного тока

Если возбудитель постоянного тока (будь то независимо возбуждаемый или параллельный самовозбуждающийся) возбужден до своего номинального напряжения при номинальной скорости вращения (которая остается неизменной) и включен на цепь возбуждения возбуждаемой машины через магнитный регулятор (при помощи которого регулируется ток его якоря, § 182), то рабочая характеристика такого возбудителя является внешней характеристикой генератора постоянного тока, которая была рассмотрена выше. При независимом возбуждении она представляет собой (§ 166, п. «а») зависимость:

$$U = f(I_a) \text{ при } n_N = \text{const}; \quad \beta = \text{const}; \quad i_n = \text{const};$$

при параллельном самовозбуждении (§ 173, а) зависимость:

$$U = f(I_a) \text{ при } n_N = \text{const}, \quad \beta = \text{const}; \quad R_n = \text{const}.$$

Если же, как ныне общепринято, магнитного регулятора в цепи якоря возбудителя не имеется, то ток якоря возбудителя регулируется реостатом в цепи возбуждения возбудителя, и тогда рабочая характеристика возбудителя будет представлять зависимость:

$$U = f(i_n) \text{ при } n_N = \text{const}; \quad \beta = \text{const}; \quad R = \text{const}$$

и

$$I_a^* = \frac{U}{R} = \text{var},$$

где  $R$  — сопротивление цепи возбуждения возбуждаемой машины, т. е. сопротивление внешней цепи, приключенной к якорю возбудителя.

Эту характеристику можно назвать внешней рабочей характеристикой возбудителя постоянного тока (фиг. 268, кривая 2).

Прибавляя к  $U$  падение напряжения возбудителя от суммы сопротивлений  $R$  в цепи его якоря, получим зависимость:

$$E_b = f(i_n) \text{ при } n_N = \text{const}; \quad \beta = \text{const}; \quad R = \text{const}$$

и

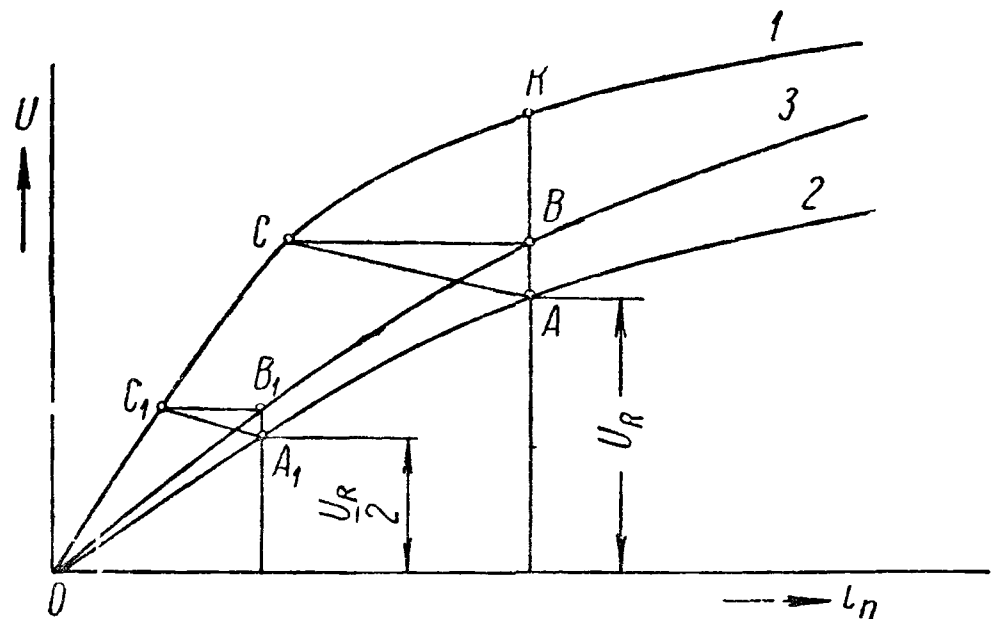
$$I_a = \frac{U}{R} = \text{var}.$$

Эту кривую можно назвать внутренней рабочей характеристикой возбудителя постоянного тока (фиг. 268, кривая 3).

<sup>1</sup> При восстановлении Днепровской гидростанции, разрушенной фашистами во время войны 1941—1945 гг., на ней были установлены синхронные генераторы повышенной мощности 103 000 *кв*а, с возбудителями, насаженными на вал главного генератора.

Пусть при номинальном токе возбуждения возбуждаемой машины напряжение на якоре возбудителя равно  $U_R$ ; как правило, оно выбирается меньше номинального напряжения возбудителя; назовем его рабочим напряжением возбудителя, а соответствующее значение тока якоря возбудителя будем называть рабочим током якоря возбудителя ( $I_{aR}$ ).

При холостом ходе возбудителя с независимым возбуждением зависимость э. д. с. якоря  $E$  от тока возбуждения  $i_n$  изображается х. х. х. (фиг. 268, кривая 1). Если якорь нагружен до тока  $I_{aR}$ , то этот ток создает реакцию якоря (размагничивание генератора) и омическое падение напряжения  $I_{aR}R_\Sigma$ . Вследствие реакции якоря э. д. с. якоря  $E_b$  при токе  $I_{aR}$  будет меньше, чем при холостом ходе, и изобразится точкой  $B$ , которая расположится вправо от точки  $C$  х. х. х. на расстоянии, соответствующем (в масштабе тока возбуждения) реакции якоря. Разность  $\overline{AK} - \overline{AB} = \overline{BK}$  и представляет уменьшение э. д. с. холостого хода  $\overline{AK}$  вследствие реакции якоря. Очевидно, точка  $B$  будет представлять точку внутренней рабочей характеристики при токе  $I_{aR}$ . Напряжение же  $U_R$  на зажимах возбудителя будет меньше  $E_b$  на величину омического падения напряжения  $\overline{AB} = I_{aR}R_\Sigma$ ; точка  $A$  будет точкой внешней возбудительной характеристики.



Фиг. 268. Возбудительные характеристики генератора постоянного тока: внешняя (2), внутренняя (3) и х. х. х. (1).

При изменении тока  $i_n$  возбуждения возбудителя ток его якоря  $I_a$  будет изменяться, так как якорь замкнут на неизменное сопротивление  $R$  обмотки возбуждения возбуждаемой машины. С изменением тока якоря возбудителя будет изменяться и реакция якоря возбудителя — отрезок  $\overline{CB}$  — и омическое падение напряжения  $\overline{AB}$ . Изменение омического падения напряжения можно считать пропорциональным току якоря возбудителя; на величину же размагничивающих ампервитков якоря  $\overline{CB}$  будет оказывать влияние насыщение машины, сказывающееся в наибольшей степени на колене х. х. х. Для точек х. х. х. на начальной прямолинейной части, а также для точек, лежащих за коленом, где х. х. х. опять приближается к прямой, реакция якоря будет исчезающе мала. Таким образом, отрезок  $\overline{CB}$  нельзя считать пропорциональным току якоря возбудителя. При токе якоря  $I_a < I_{aR}$ , например, при  $I_a = \frac{1}{2} I_{aR}$ , отрезок  $\overline{AB}$  уменьшится вдвое, отрезок  $\overline{CB}$  уменьшится более значительно, и характеристичный треугольник  $ABC$  примет вид треугольника  $A_1B_1C_1$ . Внутренняя рабочая характеристика при  $I_a = 0$  пройдет через 0, а при больших значениях  $I_a > I_{aR}$  будет приближаться к х. х. х. (фиг. 268, кривая 3). Внешняя рабочая характеристика изобразится на фиг. 268 кривой 2.

Все сказанное распространяется, очевидно, и на возбудитель с параллельным самовозбуждением, что в пояснениях не нуждается.

---

---

## ГЛАВА VIII

### СВОЙСТВА ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

#### А. ПЕРЕХОД ОТ ГЕНЕРАТОРНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ К ДВИГАТЕЛЬНОМУ. ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

##### 185. Общее замечание

Как указывалось во введении, из закона Ленца (гласящего, что перемещение в магнитном потоке замкнутого проводника вызывает появление в нем тока, препятствующего этому перемещению) вытекает, что все эл. машины энергетически обратимы, т. е. могут работать как генераторами, так и двигателями. Тем не менее, при выпуске с завода всякой вновь изготовленной машины завод непременно указывает на ее заводском щитке, предназначена ли она для генераторной или для двигательной работы. Если же, как это бывает в машинах малой и средней мощности, машина предназначена для работы как в качестве генератора, так и в качестве двигателя, то на щитке указываются отдельно номинальные данные для каждого режима.

На практике к генераторам и к двигателям предъявляются различные эксплуатационные требования, одновременный учет которых при проектировании эл. машины не всегда возможен, а потому машина, выполненная для генераторной работы при определенных номинальных данных, не всегда будет удовлетворять требованиям, предъявляемым к двигателю, и наоборот. В частности, к параллельному генератору предъявляется требование повышенного номинального напряжения по сравнению с двигателем для той же ступени сетевого напряжения (например, для генератора 230 в, а для двигателя 220 в); при этом параллельный генератор должен допускать (путем регулирования его тока возбуждения) возможность поддержания этого напряжения при полной нагрузке. По этой причине, применяя параллельный двигатель постоянного тока в качестве генератора постоянного тока, необходимо иметь достаточный запас в обмотке возбуждения, а для этого нужно вращать его при неизменной скорости, большей, чем номинальная скорость вращения двигателя процентов на 15—20.

Выше все вопросы мы рассматривали только применительно к генераторному режиму работы машины постоянного тока, теперь нам необходимо обобщить их и на двигательный режим работы. Это будет сделано в последующих параграфах этой главы, но прежде всего остановимся на вопросе о направлении вращения при переходе от генераторного к двигательному режиму работы.

##### 186. О направлении вращения машины постоянного тока при переходе ее от генераторного к двигательному режиму работы

При генераторной работе машины постоянного тока происходит преобразование механической энергии, подведенной к валу машины, в электрическую энергию. При установившемся процессе преобразования энергии вращающий электромагнитный момент, развиваемый генератором, должен быть равен по



величине и обратен по направлению моменту вращения на валу машины, создаваемому двигателем, который приводит ее во вращение.

Для определения направления действия электромагнитного вращающего момента, создаваемого эл. машиной, можно исходить из закона Био-Савара для механической силы  $f$ , действующей на проводник с током, и воспользоваться одним из существующих мнемонических правил. Самым старым и общеизвестным является правило трех пальцев левой руки, впервые сформулированное Флемингом. Применительно к машине постоянного тока более удобным является следующее правило. Чертим направление магнитных потоков обмотки возбуждения и якоря, пользуясь для этого правилом правой руки (§ 47). При правом вращении якоря машины, работающей генератором, под северным полюсом токи в проводниках его обмотки будут совпадать с направлением индуцируемой э. д. с. и будут направлены: под северным полюсом от нас, под южным полюсом к нам. Применяя правило правой руки, получим, что магнитный поток якоря  $\Phi_a$  будет направлен справа налево.

В двухполюсной машине, располагая северный полюс сверху (фиг. 269), получим, по тому же правилу, что поток, создаваемый обмоткой возбуждения, будет направлен сверху вниз. Вследствие реакции якоря результирующий магнитный поток  $\Phi_b$ , который должен быть принят во внимание для вычисления по закону Био-Савара электромагнитного вращающего момента, будет несколько меньше  $\Phi_n$  и сместится несколько по направлению вращения; однако при решении интересующего нас вопроса мы можем пренебречь реакцией якоря и исходить из магнитного потока  $\Phi_n$ .

При указанных условиях можно установить следующее правило для определения направления действия электромагнитного вращающего момента генератора постоянного тока: вращающий электромагнитный момент стремится повернуть якорь в сторону минимального угла для совпадения потока якоря  $\Phi_a$  с потоком полюсов  $\Phi_n$ . На фиг. 269 он будет действовать против часовой стрелки, т. е. будет направлен навстречу внешнему вращающему моменту, создающему вращение машины.

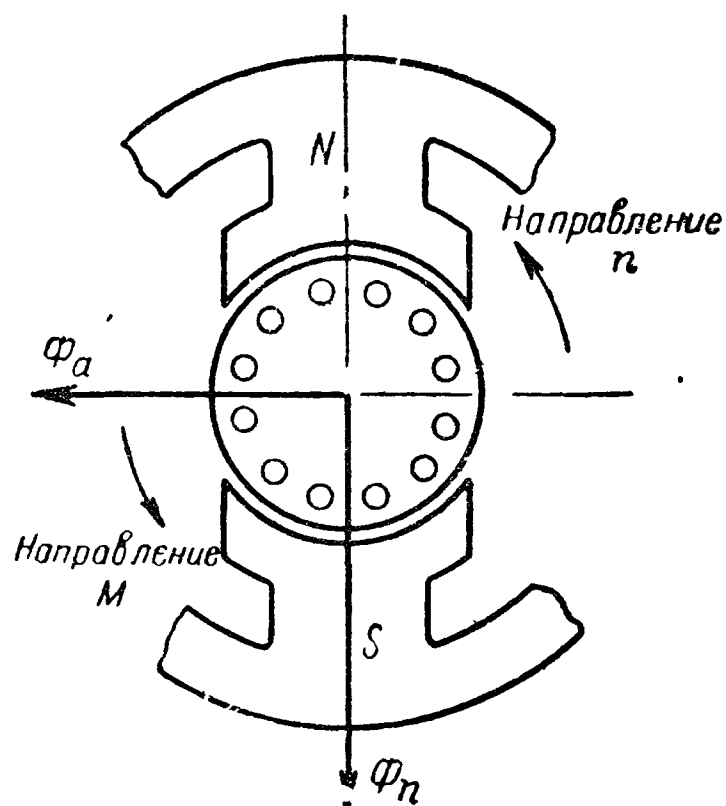
Очевидно, что если, сохранив прежним направление магнитного потока полюсов (т. е. направление тока в возбуждающей обмотке) и направление тока в обмотке якоря, удалить внешний вращающий момент, то под влиянием своего электромагнитного вращающего момента машина должна начать вращаться в обратную сторону. Это обстоятельство было уже отмечено в гл. V (§ 120) и может быть теперь сформулировано следующим образом:

*При тех же направлениях тока в якорной и возбуждающей обмотках машина постоянного тока, работая двигателем, вращается в сторону, обратную той, в которую ее нужно вращать при работе генератором.*

Отсюда вытекает следствие

*Если одно из направлений токов, либо в якорной обмотке, либо в возбуждающей обмотке, изменить на обратное, то машина, работая двигателем, будет вращаться в ту же сторону, в которую она вращалась, работая генератором.*

К вопросу можно подойти и по-иному. При работе генератором машина посылает энергию в сеть, при этом в якоре направление э. д. с. и направление тока совпадают. При работе двигателем машина должна получать энергию из сети, следовательно, направление тока в проводах, соединяющих якорь



Фиг. 269. Магнитные потоки якоря и полюсов и направление вращающего момента двигателя.



с сетью, должно измениться на обратное. Это возможно, очевидно, только в том случае, если напряжение сети  $U$  станет больше э. д. с. якоря  $E_b$  (или, что равнозначуще, если э. д. с.  $E_b$  станет меньше напряжения сети  $U$ ). При этом ток, изменив свое направление в проводах, идущих от сети к машине, изменит свое направление в обмотке якоря и будет направлен навстречу э. д. с. якоря (в этом смысле и говорят об обратной э. д. с., обратной по отношению к току). Разность между напряжением сети  $U$  и э. д. с.  $E_b$  должна быть, очевидно, равна падению напряжения в якоре  $I_a R_a$  и в контакте щеток  $I_a R_B$  (в случае наличия последовательной обмотки возбуждения, обмотки добавочных полюсов и компенсационной обмотки сюда присоединяется и падение напряжения в этих обмотках:  $I_a R_s + I_a R_w + I_a R_c$ ). Таким образом, получаем:

$$U - E_b = I_a R_\Sigma,$$

где

$$R_\Sigma = \sum R = R_a + R_B + R_s + R_w + R_c$$

— сумма всех сопротивлений в цепи якоря. Отсюда

$$U = E_b + I_a R_\Sigma. \quad (448)$$

Сравнивая это с выражением для цепи якоря при генераторной работе (249)

$$U = E_b - I_a R_\Sigma,$$

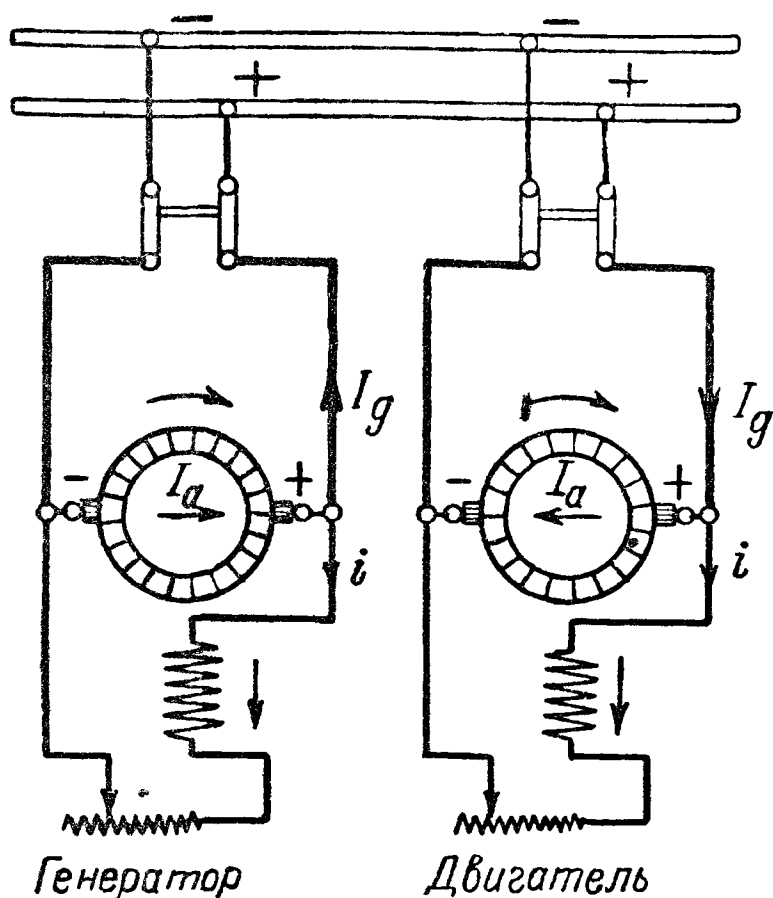
видим, что при переходе от генераторной работы к двигательной работе направление индуцируемой в якоре э. д. с. должно остаться без изменения. Предполагая, что при этом не производится никаких пересоединений обмоток, можно сказать, что направление э. д. с. в обмотке якоря будет зависеть только от двух факторов: от направления потока полюсов (тока возбуждения) и от направления вращения, следовательно, направление э. д. с. останется прежним лишь при условии, если останутся без изменения оба эти фактора. Изменение одного из них, а именно, направления потока (т. е. тока в обмотке возбуждения) потребует для восстановления прежнего направления э. д. с. изменения на обратное и другого фактора, т. е. направления вращения машины.

Итак, можем сказать, что при переходе от генераторной к двигательной работе машина сохранит свое прежнее направление вращения только в том случае, если при этом переходе направление потока возбуждения, т. е. тока возбуждения, не изменится.

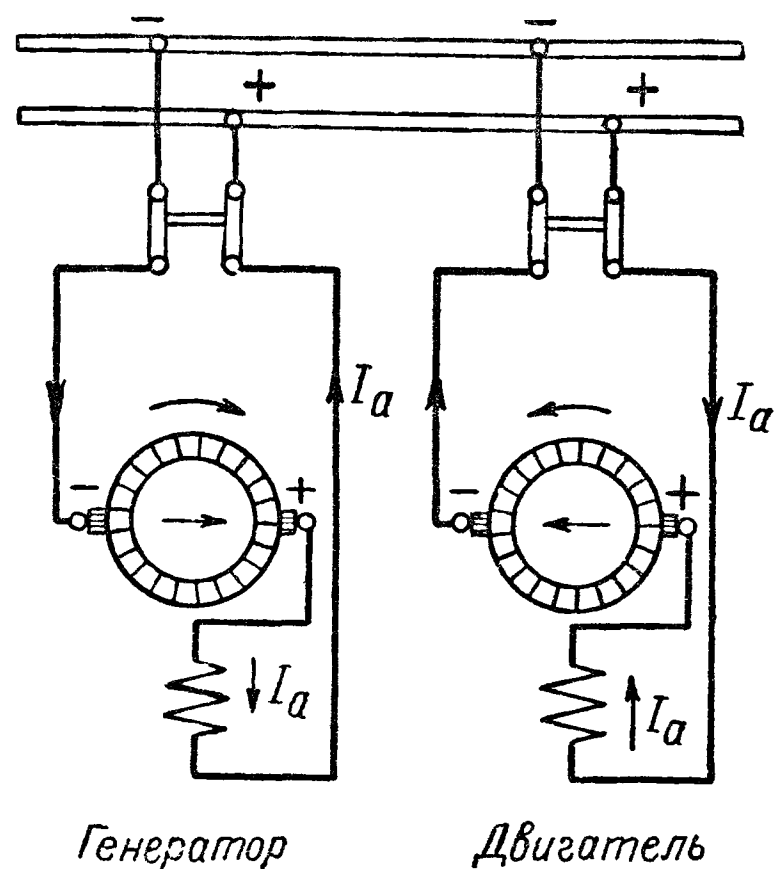
Нетрудно видеть, что в этом отношении параллельная и последовательная машина будут вести себя по-разному.

В самом деле, в параллельной машине при переходе от генераторного режима к двигательному направление основного магнитного потока, или тока в возбуждающей обмотке, измениться не может, так как полярность зажимов, к которым она присоединена, остается прежней. Поэтому параллельная машина, переходя от работы генератором к работе двигателем, сохраняет прежнее направление вращения (фиг. 270). И вообще можем сказать, что характер режима работы параллельной машины (т. е. будет ли он генераторным или двигательным) будет всецело определяться соотношением значений напряжения сети и э. д. с., индуцированной в якоре машины. Так как величина э. д. с. в якоре зависит от основного магнитного потока, а поток зависит от тока в обмотке возбуждения, то, изменяя ток возбуждения при помощи регулировочного реостата включенного в цепь возбуждения, можно совершенно плавно менять направление тока в обмотке якоря, т. е. переходить от генераторной работы, когда в якоре ток и э. д. с. совпадают по направлению, к двигательной работе, когда ток и э. д. с. в якоре направлены друг другу навстречу.

Нетрудно видеть, что последовательная машина, в которой обмотка возбуждения соединена последовательно с якорем, будет вести себя по-иному (фиг. 271). При изменении направления тока в якоре, вызываемом переходом от генераторного режима к двигательному, изменится на обратное и направление тока в обмотке возбуждения, а следовательно, для сохранения прежнего направления э. д. с. в якоре, машина должна вращаться в обратную сторону.



Фиг. 270 Направление вращения генератора и двигателя с параллельным возбуждением.



Фиг. 271 Направление вращения генератора и двигателя с последовательным возбуждением.

### 187. Характеристическое уравнение двигателя постоянного тока

Характеристическое уравнение (407), написанное для генераторных режимов работы машин постоянного тока, является характеристическим уравнением и для двигательных режимов их работы вследствие энергетической обратимости (§ 6) машин постоянного тока

Угол сдвига щеток с геометрической магнитной нейтралью  $\beta$  ныне для двигателей постоянного тока можно считать неизменным как в случае отсутствия добавочных полюсов (когда  $\beta > 0$ ), так и при их наличии (когда  $\beta = 0$ ). Таким образом, можем принять, как и в случае генераторов, что  $\beta = \text{const}$ .

В отличие, однако, от генераторов, для которых, как правило, скорость вращения остается неизменной,  $n = \text{const}$ , в двигателях, как правило, неизменным является напряжение на их зажимах,  $U = \text{const}$ , вследствие этого характеристическое уравнение (407) для двигателей постоянного тока принимает вид

$$f_D(I_a, i_n, n) = 0. \quad (449)$$

Это уравнение является уравнением поверхности, при сечении которой плоскостями, параллельными координатным плоскостям, получим три серии характеристик двигателей постоянного тока

$$\left. \begin{aligned} 1) \quad n &= f_1(I_a) \text{ при } i_n = \text{const}, \\ 2) \quad i_n &= f_2(I_a) \text{ при } n = \text{const}, \\ 3) \quad n &= f_3(i_n) \text{ при } I_a = \text{const}. \end{aligned} \right\} \quad (450)$$

Рассматривать эти три серии характеристик применительно к возможным способам взаимосоединений их возбуждающей и якорной обмоток, подобно тому как это мы делали в случае генераторов, не представляет интереса. При изучении свойств двигателей постоянного тока нужно исходить из той непосредственной цели, для которой они предназначены, а именно выполнения механической работы за счет подведенной к двигателю эл. энергии.

### 188. Основные рабочие характеристики двигателя постоянного тока

Первостепенное значение для оценки свойств двигателей постоянного тока разных способов возбуждения имеют следующие вопросы:

1) Как изменяется, при работе от неизменного напряжения ( $U = \text{const}$  и при неизменном положении щеток на коллекторе ( $\beta = \text{const}$ ), скорость вращения  $n$  двигателей данного способа возбуждения в зависимости от нагрузки<sup>1</sup> двигателя  $I_a$ :

$$n = f(I_a) \text{ при } U = \text{const}, \quad \beta = \text{const}.$$

Эту зависимость будем называть *скоростной характеристикой* двигателя постоянного тока; это по существу первая из вышеуказанных серий характеристик (450).

2) Как изменяется при тех же условиях электромагнитный вращающий момент  $M$  двигателя данного способа возбуждения в зависимости от нагрузки двигателя  $I_a$ :

$$M = f(I_a) \text{ при } U = \text{const}, \quad \beta = \text{const}.$$

Эту зависимость будем называть *моментной характеристикой* двигателя постоянного тока, она непосредственно не входит в серии вышеперечисленных характеристик (450), хотя и связана с ними

3) Как изменяется при тех же условиях электромагнитный вращающий момент двигателя  $M$  данного способа возбуждения в зависимости от скорости вращения двигателя  $n$ :

$$M = f(n) \text{ при } U = \text{const}, \quad \beta = \text{const}.$$

Эту зависимость будем называть *механической характеристикой* двигателя постоянного тока, как увидим ниже, эта зависимость представляет собой следствие первых двух зависимостей; она имеет важное значение для оценки свойств двигателей, в особенности параллельных двигателей

В совокупности скоростная, моментная и механическая характеристики двигателей постоянного тока представляют собой их основные рабочие характеристики.

Следующими вопросами, важными с точки зрения оценки свойств двигателей постоянного тока, являются условия пуска в ход и регулирование скорости вращения двигателей данного способа возбуждения, что будет рассмотрено дальше в особых разделах данной главы.

### 189. Уравнение скоростной характеристики двигателя постоянного тока

Это уравнение можем получить из выражения для э. д. с.  $E_b$ , индуцируемой в якоре при нагрузке (198, а):

$$E_b = \frac{p n_b}{60} \Phi_b \frac{N}{a} \cdot 10^{-8} \text{ в}, \quad (451)$$

где  $\Phi_b$  — результирующий магнитный поток в двигателе (в максвеллах), получающийся от взаимодействия м. д. с. обмотки возбуждения и м. д. с.

<sup>1</sup> Нагрузка двигателя, т. е. его мощность при неизменном напряжении двигателя на его зажимах ( $U = \text{const}$ ), определяется током в обмотке якоря  $I_a$ .

якорной обмотки, а индекс  $b$  у  $n$  имеет целью подчеркнуть, что скорость вращения зависит от нагрузки.

Из (451) получаем:

$$n_b = \frac{60aE_b}{pN\Phi_b} \cdot 10^8 = C_n \frac{E_b}{\Phi_b}. \quad (452)$$

Здесь

$$C_n = \frac{60a}{pN} \cdot 10^8 = \text{const}$$

является для данного двигателя величиной постоянной.

Подставляя в (452) вместо  $E_b$  его выражение из (448), получаем:

$$n_b = C_n \frac{U - I_a R_\Sigma}{\Phi_b}, \quad (453)$$

здесь

$$I_a R_\Sigma = I_a R_a + 2\Delta U_b.$$

Выше (§ 110) указывалось, что как при отсутствии добавочных полюсов, когда щетки должны быть сдвинуты с геометрической магнитной нейтрали против направления вращения двигателя, так и при наличии добавочных полюсов, когда щетки должны стоять строго на геометрической магнитной нейтрали, реакция якоря будет размагничивать магнитную систему машины, т. е. будет уменьшать поток машины против того значения его  $\Phi_n$ , которое он имел бы только при наличии тока  $i_n$  в обмотке возбуждения. Следовательно, можем написать, что

$$\Phi_b = \Phi_n - \Delta\Phi_b, \quad (454)$$

где  $\Delta\Phi_b$  зависит от тока якоря  $I_a$  и от насыщения магнитной системы, т. е. по существу от тока возбуждения  $i_n$ . Поэтому можем написать:

$$\Delta\Phi_b = f_1(I_a, i_n), \quad \Phi_n = f_2(i_n). \quad (455)$$

Подставляя выражение (454) в (453), получаем:

$$n_b = C_n \frac{U - I_a R_\Sigma}{\Phi_n - \Delta\Phi_b}. \quad (456)$$

Это и будет скоростной характеристикой двигателя постоянного тока.

## 190. Уравнения моментной характеристики и механической характеристики двигателя постоянного тока

а) Полученную нами в гл V (§ 122) зависимость  $M = f(I_a)$  можно переписать в таком виде:

$$M_b = \frac{60}{2\pi n_b} E_b I_{ab}, \quad (457)$$

где дополнительный индекс  $b$  у символов  $n$  и  $I_a$  имеет целью подчеркнуть, что здесь  $n$  и  $I_a$  зависят от нагрузки двигателя; ту же цель имеет и индекс  $b$  у обозначения вращающего момента. Заменяя в (457)  $E_b$  его значением из (451):

$$E_b = \frac{pn_b}{60} \Phi_b \frac{N}{a} \cdot 10^{-8}$$

и производя преобразования, получаем моментную характеристику:

$$M_b = \frac{pN}{2\pi a} \cdot 10^{-8} \Phi_b I_{ab} = C_m \Phi_b I_{ab}, \quad (458)$$

где

$$C_m = \frac{pN}{2\pi a} \cdot 10^{-8} = \text{const}$$

постоянная

б) Из того же выражения (457), обозначая эл. магнитную мощность при данной нагрузке через

$$P_{ab} = E_b I_{ab},$$

получим уравнение механической характеристики двигателя постоянного тока:

$$M_b = \frac{60}{2\pi n_b} P_{ab} = C \frac{P_{ab}}{n_b}; \quad (459)$$

здесь

$$C = \frac{60}{2\pi} = \text{const}$$

постоянная.

### 191. Основные рабочие характеристики параллельного двигателя постоянного тока

а) Скоростная характеристика параллельного двигателя. Рассмотрим выражение (456) применительно к параллельному двигателю. Представим это выражение в таком виде:

$$n_b = C_n \frac{U - I_{ab} R_\Sigma}{\Phi_n - \Delta\Phi_b} = C_n \frac{U}{\Phi_n} \cdot \frac{1 - \frac{I_{ab} R_\Sigma}{U}}{1 - \frac{\Delta\Phi_b}{\Phi_n}} = n_0 A, \quad (460)$$

где

$$n_0 = C_n \frac{U}{\Phi_n} = \text{const}, \quad A = \frac{1 - \frac{I_{ab} R_\Sigma}{U}}{1 - \frac{\Delta\Phi_b}{\Phi_n}}.$$

Предположим, в первом приближении, что

$$\frac{I_{ab} R_\Sigma}{U} = c I_{ab}; \quad \frac{\Delta\Phi_b}{\Phi_n} = z I_{ab}, \quad (461)$$

где  $c$  и  $z$  — коэффициенты пропорциональности току  $I_{ab}$ .

Приблизительно можно написать:

$$A = \frac{1 - \frac{I_{ab} R_\Sigma}{U}}{1 - \frac{\Delta\Phi_b}{\Phi_n}} = \frac{1 - c I_{ab}}{1 - z I_{ab}} \approx 1 - c I_{ab} + z I_{ab} = 1 - (c - z) I_{ab} \quad (462)$$

Очевидно возможны три случая соотношений между  $c$  и  $z$ .

1)  $c - z = 0$ ; 2)  $c - z > 0$ ; 3)  $c - z < 0$ .

При  $c - z = 0$  имеем  $A = 1$  и из (460) получим:

$$n_b = C_n \frac{U}{\Phi_n} = n_0 = \text{const}. \quad (463)$$



В этом случае  $n_b$  не зависит от  $I_{ab}$  и на фиг. 272 может быть представлено пунктирной прямой (прямая 1), параллельной оси абсцисс, проведенной через значение  $n_b = n_0$  на оси ординат, — горизонтальная скоростная характеристика.

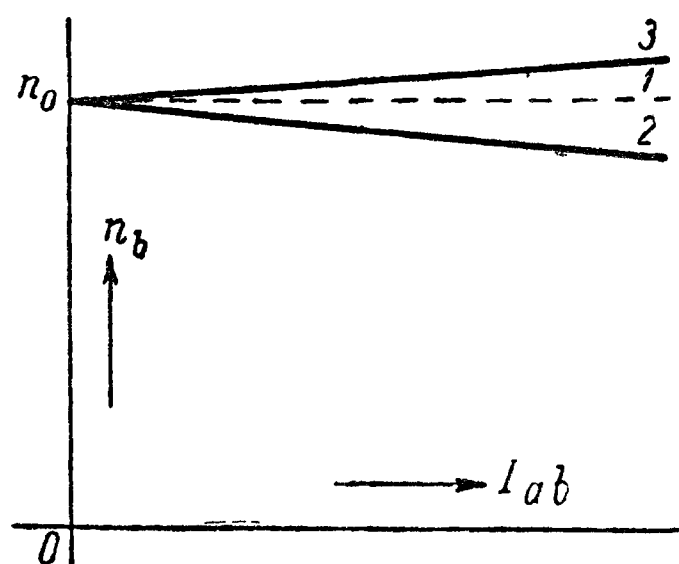
Если  $c - z > 0$ , то  $A = 1 - (c - z) I_{ab}$  и из (460) получим:

$$n_b = n_0 [1 - (c - z) I_{ab}] = n_0 - n_0 (c - z) I_{ab}. \quad (464)$$

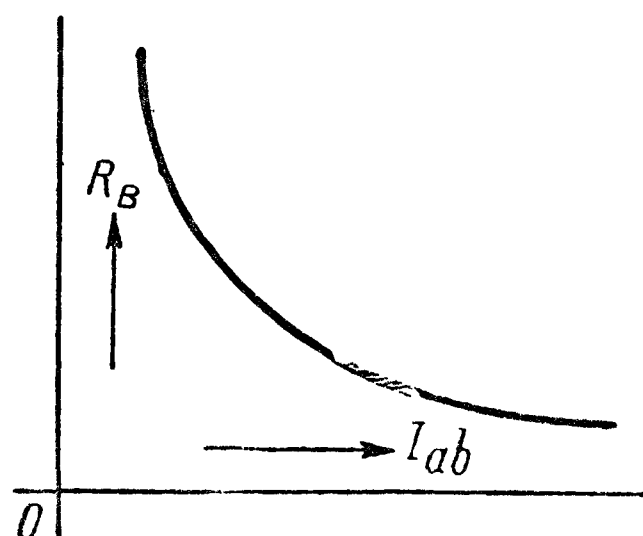
Это дает на фиг. 272 прямую 2, проведенную через  $n_0$  с наклоном в сторону абсцисс; получим падающую скоростную характеристику.

Если  $c - z < 0$ , то  $A = 1 + (z - c) I_{ab}$ , и тогда получим:

$$n_b = n_0 + n_0 (z - c) I_{ab}. \quad (465)$$



Фиг. 272. Скоростные характеристики параллельного двигателя постоянного тока при отсутствии реакции якоря и  $R_\Sigma = \text{const}$ .



Фиг. 273. Изменение сопротивления  $R_B$  щеток в зависимости от тока  $I_{ab}$

На фиг. 272 этому соответствует прямая 3, — возрастающая скоростная характеристика.

К этому рассуждению необходимы два уточнения. Первое из них касается сопротивления цепи якоря  $R_\Sigma$ . Как было отмечено выше, его можно считать неизменным только в первом приближении. В действительности же при неизменной температуре остается неизменным только суммарное сопротивление  $R'$  обмотки якоря и прочих обмоток, последовательно с ней включенных (обмотки добавочных полюсов и компенсационной, если они имеются); что же касается сопротивления переходного контакта щеток  $R_B$ , то с ростом тока  $I_{ab}$  оно быстро падает, а затем, начиная с некоторого значения  $I_{ab}'$ , изменяется обратно пропорционально току  $I_{ab}$  (фиг. 273). Таким образом, после достижения значения  $I_{ab}'$  произведение  $R_B I_{ab}$  принимает практически постоянное значение, т. е. не зависит от  $I_{ab}$  (фиг. 274, кривая 1). Поэтому выражение  $I_{ab} R_\Sigma / U$ , начиная с  $I_{ab}'$ , можно представить так:

$$\frac{I_{ab} R_\Sigma}{U} = \frac{I_{ab} R'}{U} + \frac{I_{ab} R_B}{U} = c_1 I_{ab} + b,$$

где

$$c_1 = \frac{R'}{U} = \text{const}$$

и, начиная с некоторого значения  $I_{ab} = I_{ab}'$ ,

$$b = \frac{I_{ab} R_B}{U} = \text{const}.$$

Если бы этот закон сохранялся от  $I_{ab} = 0$ , то мы могли бы написать:

$$A = \frac{1 - c_1 I_{ab} - b}{1 - z I_{ab}} \approx 1 - c_1 I_{ab} - b + z I_{ab} = 1 - b - (c_1 - z) I_{ab},$$

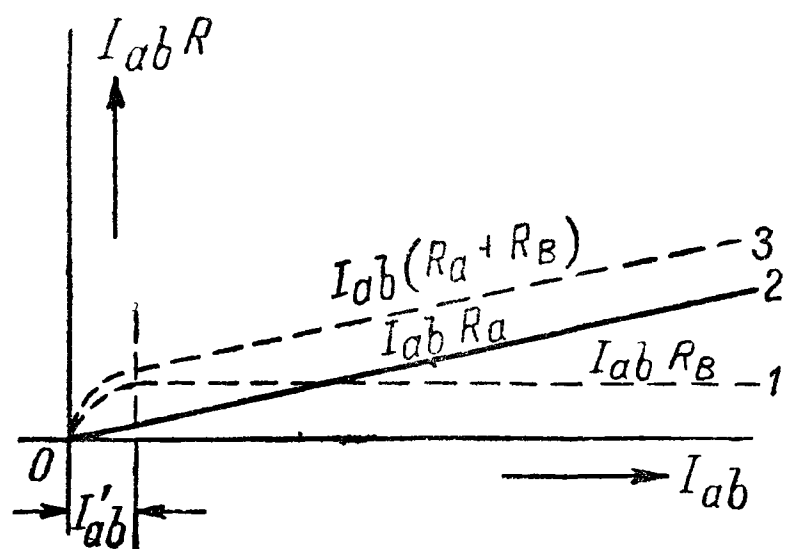
$$n_b = n_0 (1 - b) - n_0 (c_1 - z) I_{ab} = n' - n_0 (c_1 - z) I_{ab},$$

где

$$n' = n_0 (1 - b) = \text{const.}$$

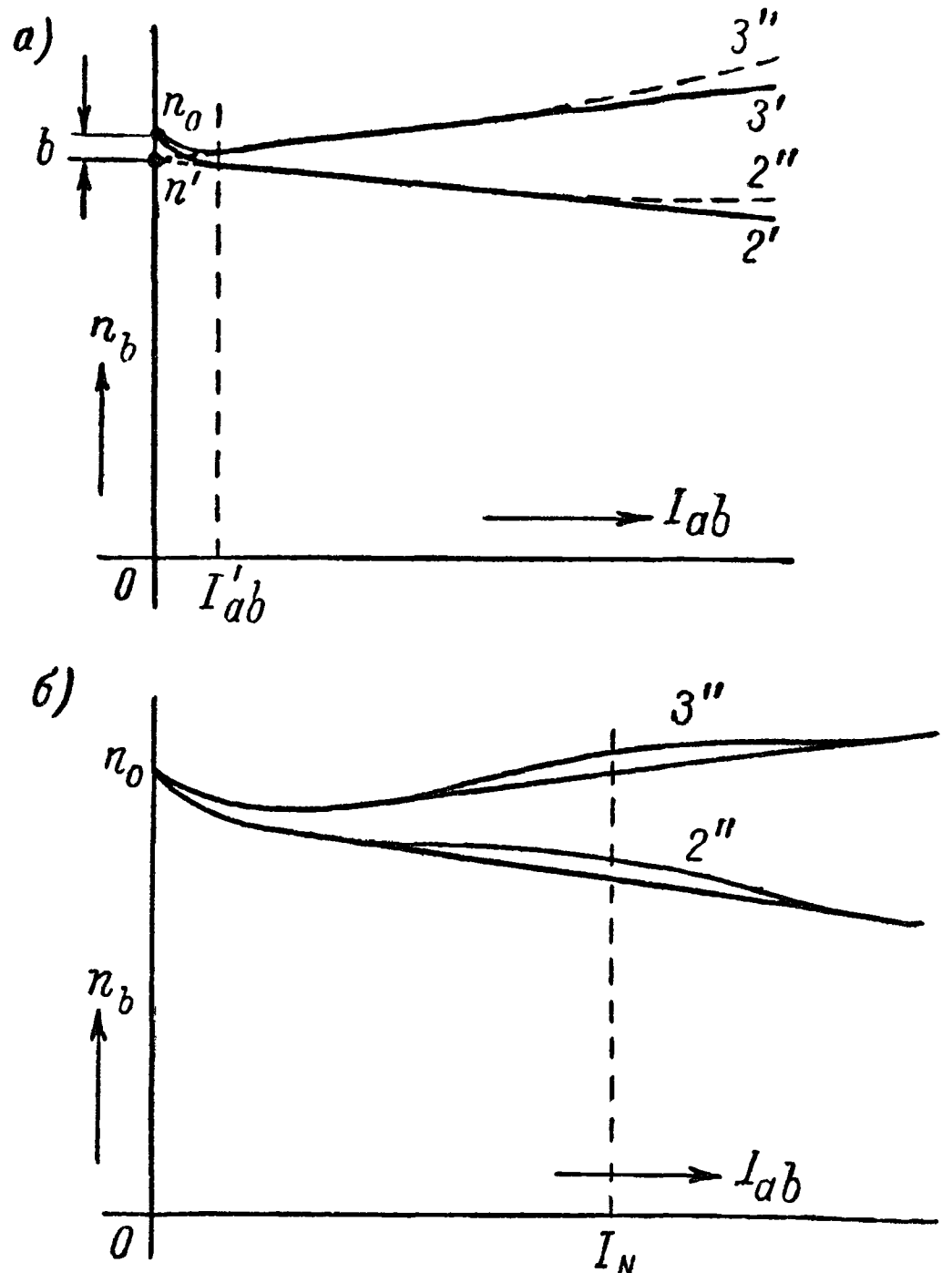
В этом случае вместо прямых 2 и 3 на фиг. 275, а мы имели бы прямые 2', 3', начинающиеся с  $n' < n_0$ . В действительности характеристики должны начинаться от точки  $n_0$ , плавно переходя при  $I_{ab} = I_{ab}'$  в прямые 2' и 3'.

Второе уточнение, которое нужно сделать, касается принятого нами допущения, что  $z = \text{const.}$  На самом деле с ростом тока  $I_{ab}$  реакция якоря будет размагничивать машину в возрастающей степени, т. е.  $z$  будет возрастать, а поэтому при падающей скоростной характеристике она будет иметь некоторую, правда незначительную, выпуклость (кривая 2'' на фиг. 275, а). Такую же



Фиг. 274. Изменения падений напряжения от тока  $I_{ab}$

1 — падение напряжения в контакте щеток;  
2 — падение напряжения в обмотке якоря,  
3 — суммарное падение напряжения



Фиг. 275. Изменение скорости вращения параллельного двигателя постоянного тока при разных предположениях.

выпуклость будет иметь и возрастающая характеристика (кривая 3'' на фиг. 275, а).

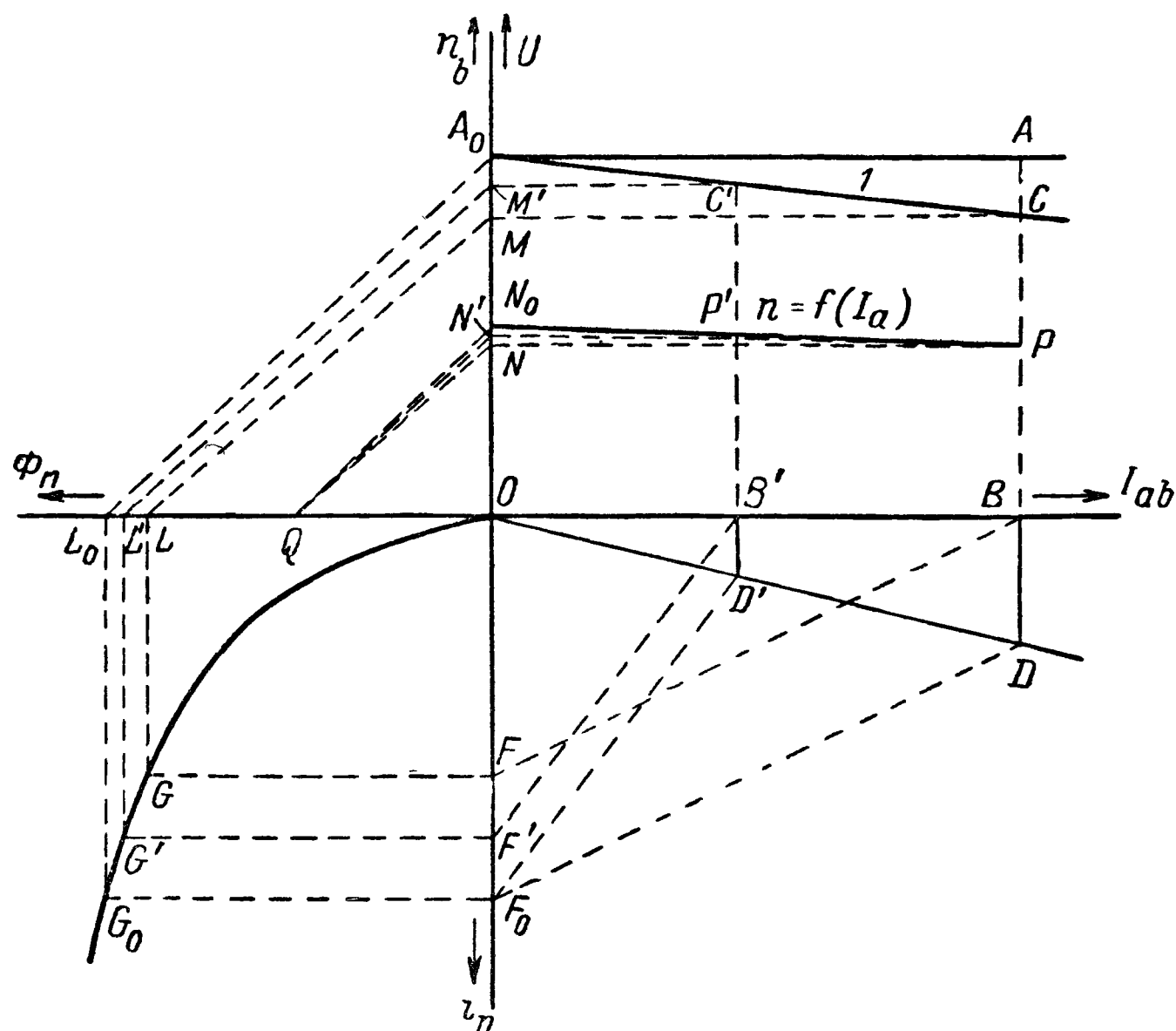
Примерно при  $I_{ab} > I_N$  реакция якоря начинает убывать и доходит до нуля, поэтому кривые 2'' и 3'' вновь переходят в прямые (фиг. 275, б).

Правильно рассчитанный параллельный двигатель должен иметь падающую скоростную характеристику, т. е. омическое падение напряжения  $I_{ab} R_\Sigma$  должно преобладать над реакцией якоря, иными словами, характеристика должна иметь вид падающей кривой 2' (см. § 192).

Скоростную характеристику параллельного двигателя можно построить, если известна его кривая намагничения (т. е. характеристика холостого хода, снятая для генераторного режима и пересчитанная на поток, § 56) и характеристический треугольник, определенный для номинального тока якоря по внешней нагрузочной характеристике в генераторном режиме работы машины. Для токов якоря, меньших, чем номинальный, считая, что стороны характе-

ристичного треугольника изменяются пропорционально току якоря, можем построение скоростной характеристики выполнить следующим образом.

Наносим кривую намагничивания  $\Phi_n = f(I_n)$  в третьем квадранте (фиг. 276). Выбрав масштаб для  $I_{ab}$  и  $U$ , строим в первом квадранте зависимость  $U - I_{ab}R_\Sigma$  (прямая 1), причем  $\overline{OA}_0 = U$  — заданное напряжение на зажимах двигателя. Эта зависимость представляет собой не что иное, как зависимость э. д. с.  $E_b$ , индуцируемой в якоре, от тока якоря  $I_{ab}$ . Пусть  $\overline{OF}_0$  соответствует данному возбуждению, тогда  $\overline{F}_0\overline{G}_0 = \overline{OL}_0$  будет представлять



Фиг. 276. Построение скоростной характеристики параллельного двигателя постоянного тока в случае  $R_\Sigma = \text{const}$ .

магнитный поток  $\Phi_n$ , имеющийся в двигателе при идеальном холостом ходе, т. е. когда  $I_{ab} = 0$ . Соответствующую этому значению  $\Phi_n$  скорость вращения  $n_b = n_0$  можно получить, разделив  $\overline{OA}_0$  на  $\overline{OL}_0$ , которое и откладываем по положительной оси ординат:

$$\overline{ON}_0 = \overline{OA}_0 / \overline{OL}_0.$$

Возьмем значение тока якоря  $I_{aN} = \overline{OB}$ . Для него по прямой  $\overline{A}_0\overline{C}$  находим  $E_b = \overline{BC}$ . Отложив отрезок  $\overline{BD} = \frac{pAW_r}{\omega_n}$ , проводим линию  $OD$

(здесь  $AW_r$  вычислены по току  $I_{ab} = \overline{OB}$ ). Отрезки вертикалей между  $OD$  и  $OB$  будут, очевидно, пропорциональны значениям  $I_{ab}$ , через которые проведены вертикали, и будут представлять размагничивающие ампервитки якоря. Соединив  $D$  с  $F_0$ , проводим линию  $\overline{BF} \parallel \overline{DF}_0$ , тогда отрезок  $\overline{FF}_0 = \overline{BD} = \frac{pAW_r}{\omega_n}$ , а следовательно,  $\overline{FG}$  представляет имеющийся при токе

якоря  $I_{ab} = I_{aN}$  результирующий магнитный поток двигателя  $\Phi_b = \overline{FG}$ , а отрезок  $\overline{BC} = \overline{OM}$  — индуцируемую этим магнитным потоком в якорной обмотке э. д. с.  $E_b$ . Очевидно, что

$$n_b = C_n \frac{E_b}{\Phi_b} = \frac{\overline{OM}}{\overline{OL}}. \quad (466)$$

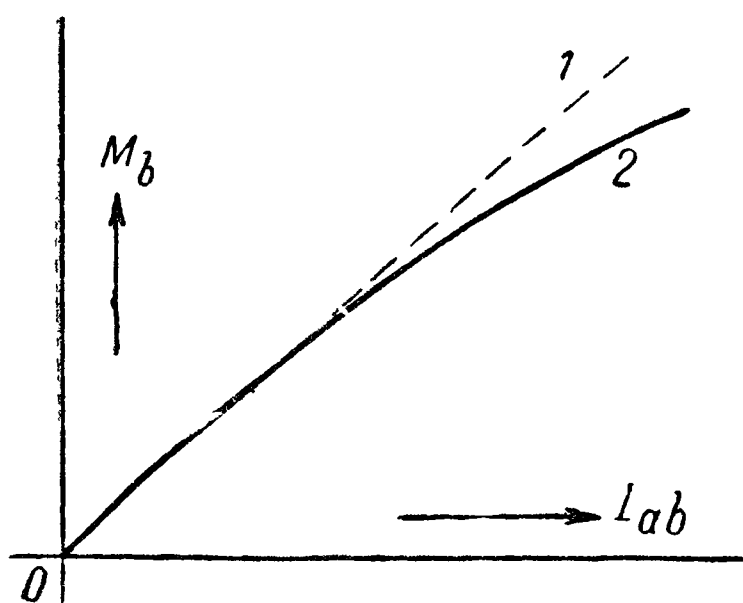
Таким путем для ряда значений  $I_{ab}$  можем найти соответствующие им значения  $n_b$  и построить  $n_b = f(I_{ab})$ , т. е. скоростную характеристику параллельного двигателя

Построение можно выполнить без вычислений по (466). В самом деле выбрав масштаб для  $n$ , откладываем  $\overline{ON}_0 = n_0$  — скорость вращения при идеальном холостом ходе двигателя. Из  $N_0$  проводим  $\overline{N}_0Q \parallel \overline{A}_0L_0$ , а из  $Q$  проводим линию  $\overline{QN} \parallel \overline{LM}$ . Тогда можем написать

$$n_0 \equiv \frac{\overline{OA}_0}{\overline{OL}_0} \equiv \frac{\overline{ON}_0}{\overline{OQ}}, \quad n_b \equiv \frac{\overline{OM}}{\overline{OL}} \equiv \frac{\overline{ON}}{\overline{OQ}}.$$

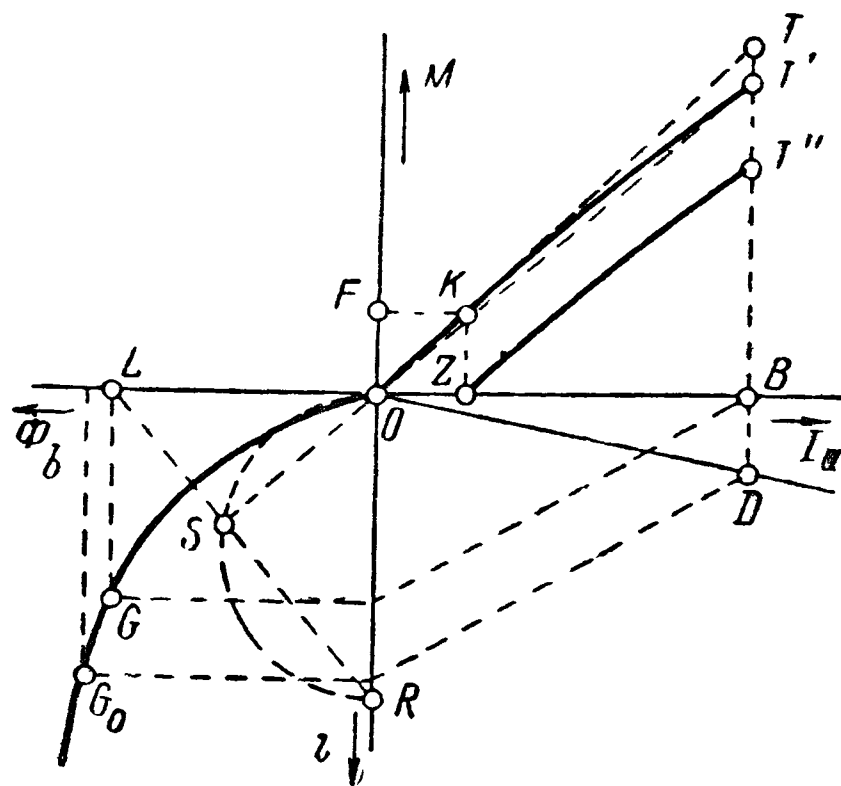
Отсюда

$$\frac{n_b}{n_0} = \frac{\overline{ON}}{\overline{ON}_0},$$



Фиг. 277 Моментная характеристика двигателя постоянного тока

1 — при постоянстве потока, 2 — действительная.



Фиг. 278 Построение моментной характеристики параллельного двигателя постоянного тока

а так как  $\overline{ON}_0 = n_0$ , то очевидно, что  $n_b = \overline{ON}$ . Проведя через  $N$  линию  $\overline{NP} \parallel \overline{OB}$ , получаем в пересечении ее с координатой  $\overline{BA}$  точку  $P$ , соответствующую характеристике  $n_b = f(I_{ab})$  для значения  $I_{ab} = \overline{OB}$ .

Построение остальных точек характеристики ясно из рисунка.

б) Моментная характеристика параллельного двигателя. Подставляя в (458) выражение (454), находим:

$$M_b = C_m \Phi_b I_{ab} = C_m [\Phi_n - \Delta\Phi_b] I_{ab}. \quad (467)$$

Если бы в двигателе не было реакции якоря, то мы имели бы  $\Delta\Phi_b = 0$  и

$$M_b = C_m \Phi_n I_{ab}.$$

Так как при неизменном токе возбуждения  $i_n$  имеем  $\Phi_n = \text{const}$ , то электромагнитный вращающий момент двигателя был бы пропорционален току  $I_{ab}$  и изображался бы на фиг. 277 пунктирной прямой 1, проходящей через  $O$ . Так как реакция якоря в действительности всегда имеется, а поэтому с возрастанием  $I_{ab}$  растет и  $\Delta\Phi_b$ , то действительная зависимость  $M_b = f(I_{ab})$  будет иметь некоторую выпуклость в сторону возрастающих ординат (фиг. 277, кривая 2).

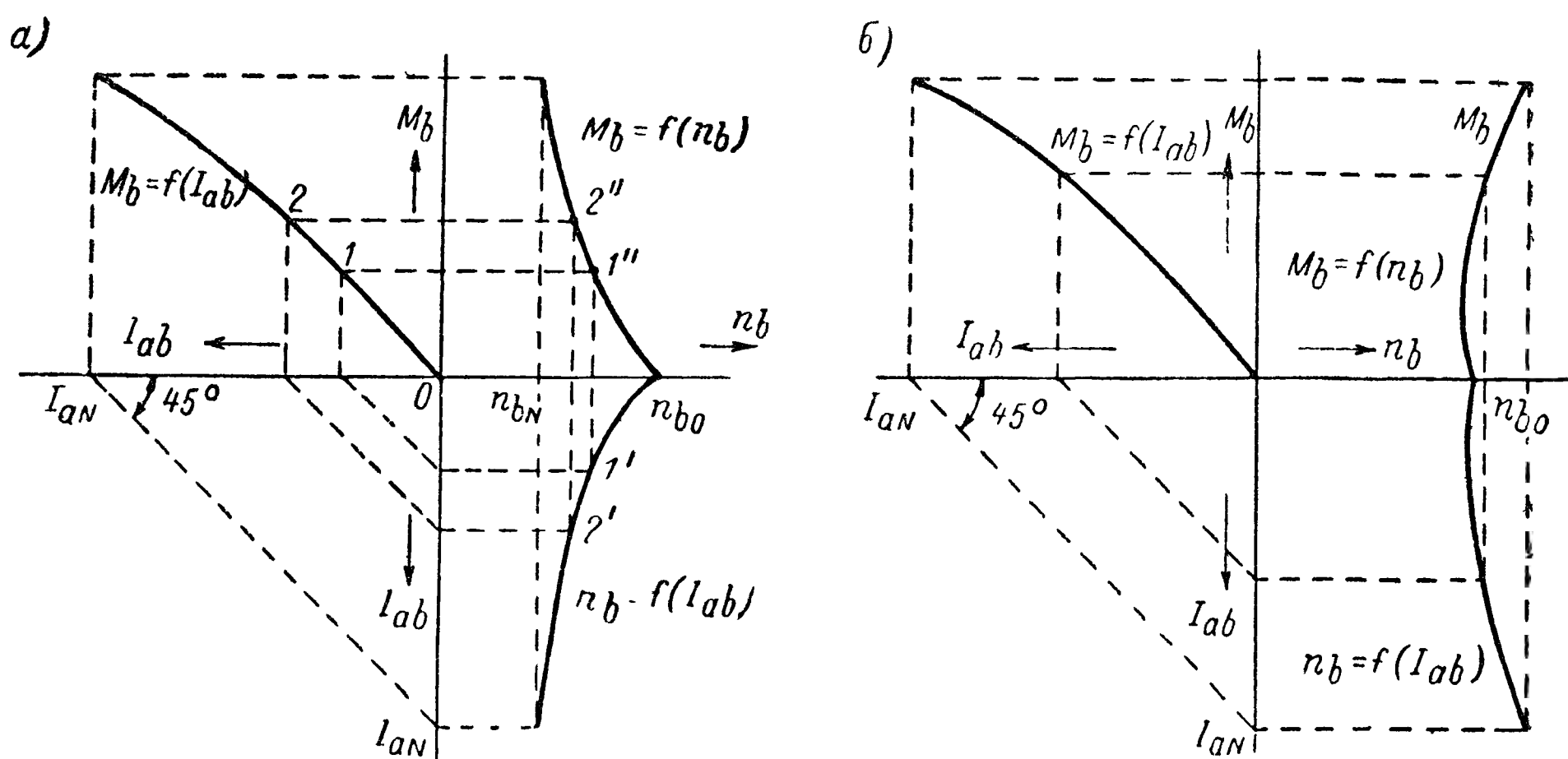
Для построения приближенной моментной характеристики по кривой намагничивания (х г. х х.) и по характеристическому треугольнику, определенному для  $I_{ab} = I_N$  по внешней нагрузочной характеристике в генераторном режиме работы машины, строим на фиг. 278 на произвольном отрезке  $\overline{OR}$  полуокружность. Пусть требуется найти точку моментной характеристики, соответствующую току  $I_{ab} = I_N = \overline{OB}$ . Тогда соединяем  $R$  с  $L$ , построив предва-

рительно, как и на фиг. 276, для тока  $I_{ab} = I_N = \overline{OB}$  линии  $\overline{BF}$ ,  $\overline{DF_0}$ ,  $\overline{F_0G_0}$ ,  $\overline{FG} = \overline{OL}$ , причем  $\overline{OL} = \Phi_b$  — результирующий поток двигателя при токе  $I_N = \overline{OB}$ ; проводим через  $S$  и  $O$  прямую до пересечения в точке  $T'$  с ординатой, проведенной в точке  $B$ . Из построения следует, что

$$\frac{\overline{BT'}}{\overline{OB}} = \frac{\overline{OL}}{\overline{OR}}$$

Отсюда

$$\overline{BT'} = \overline{OB} \cdot \overline{OL} \cdot \frac{1}{\overline{OR}} = I_{ab} \Phi_b \cdot \frac{1}{\overline{OR}} \equiv \Phi_b I_{ab}$$



Фиг. 279. Построение механической характеристики параллельного двигателя: а — при падающей скоростной характеристике, б — при возрастающей.

Таким образом,  $\overline{BT'}$  пропорционально вращающему электромагнитному моменту  $M_b$ . При выборе произвольной длины  $\overline{OR}$  можно сделать  $\overline{BT'} = M_b$ .

Построенная кривая представляет вращающий момент на валу двигателя. Если при холостом ходе двигателя для покрытия его потерь требуется вращающий момент  $\overline{OF} = \overline{ZK}$ , то ток холостого хода двигателя будет  $\overline{OZ}$ . Предполагая, что потери, имеющиеся при холостом ходе, остаются такими же и при нагрузке двигателя, мы можем получить кривую полезного вращающего момента, проведя через  $Z$  кривую  $ZT''$  на расстоянии  $\overline{KZ}$  от  $\overline{OT'}$ .

в) Механическая характеристика параллельного двигателя. Зная скоростную характеристику  $n_b = f(I_{ab})$  и моментную характеристику  $M_b = f(I_{ab})$ , можно построить и механическую характеристику  $M_b = f(n_b)$ , как показано на фиг. 279, а для случая падающей скоростной характеристики, а на фиг. 279, б — для возрастающей скоростной характеристики.

Поступаем следующим образом. Строим моментную характеристику во втором квадранте, а скоростную характеристику — в четвертом квадранте, беря для тока  $I_{ab}$  одинаковый масштаб. Взяв на моментной характеристике ряд точек  $1, 2, \dots$ , соответствующих ряду значений тока  $I_{ab}$ , и отметив теми же цифрами со штрихами соответствующие точки на скоростной характеристике, проводим линии, параллельные оси абсцисс, через точки  $1, 2, \dots$  моментной характеристики и линии, параллельные оси ординат, через точки  $1', 2', \dots$  скоростной характеристики. В пересечении соответствующих прямых получаем в первом квадранте точки  $1'', 2'', \dots$  механической характеристики.

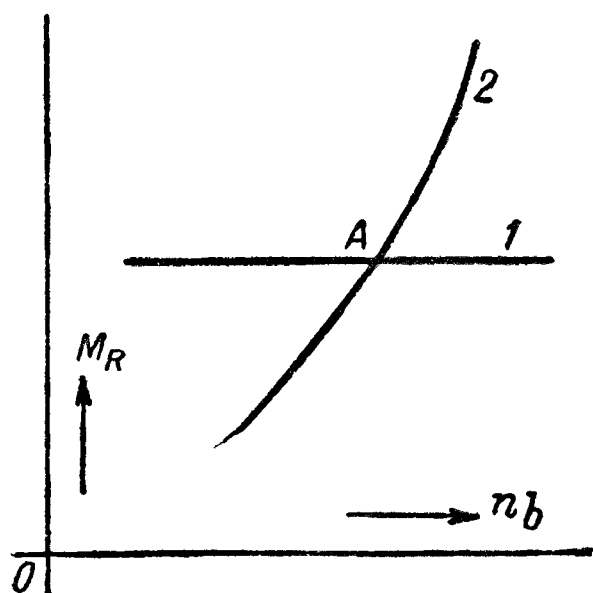


На фиг. 279, а, на котором скоростная характеристика падающая, получаем падающую механическую характеристику; на фиг. 279, б, на котором скоростная характеристика возрастающая, механическая характеристика получается тоже возрастающей.

Как сейчас увидим, для практически применяемых параллельных двигателей механическая характеристика должна быть падающей (фиг. 279, а), а для этого скоростная характеристика также должна быть падающей.

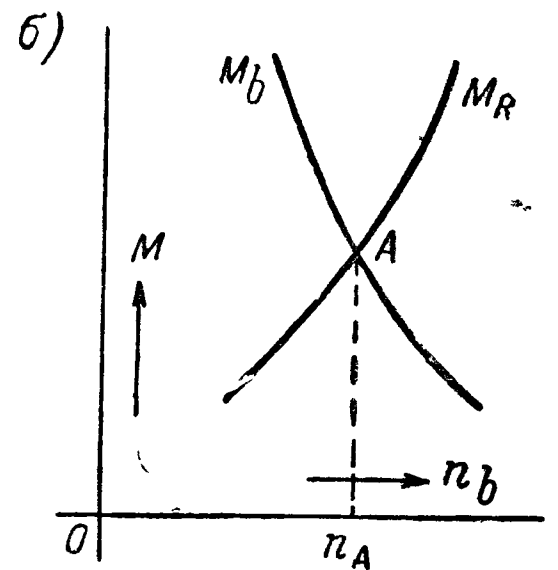
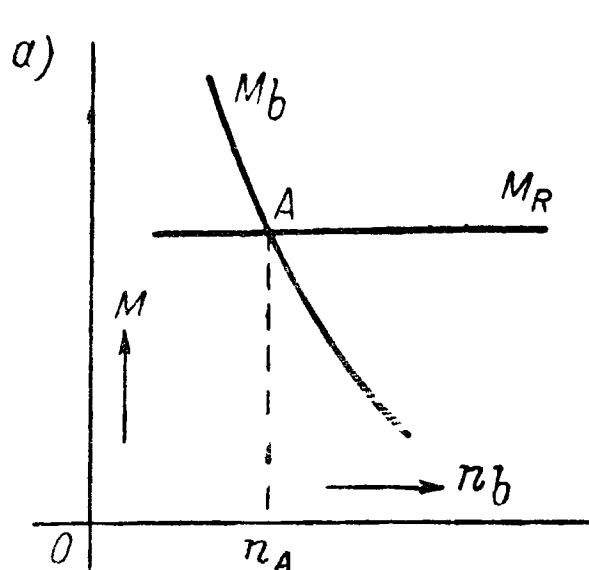
## 192. Условие устойчивой работы параллельного двигателя постоянного тока

Механические характеристики рабочих механизмов, с которыми соединяется двигатель постоянного тока, бывают обычно двух видов: либо они не зависят от скорости вращения,  $M_R = f(n) = \text{const}$ , фиг. 280, прямая 1,



Фиг. 280. Обычные механические характеристики рабочих механизмов

1)  $M_n$  — не зависит от скорости вращения; 2)  $M_R = f(n^x)$



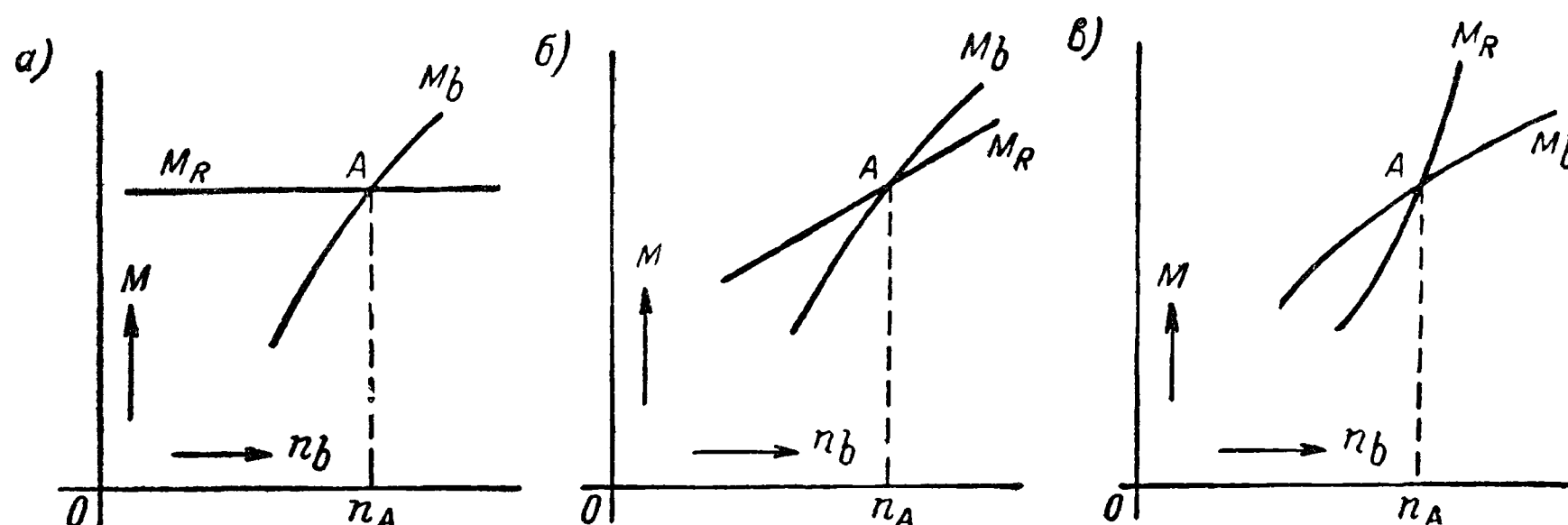
Фиг. 281. Сопоставление падающей механической характеристики  $M_b$  параллельного двигателя постоянного тока с обычными механическими характеристиками приводимых механизмов.

параллельная оси абсцисс, либо возрастают в некоторой степени  $x$  от  $n$ ,  $M_R = f(n) = kn^x$ , фиг. 280, кривая 2.

Сопоставление падающей механической характеристики параллельного двигателя постоянного тока с обычными механическими характеристиками рабочих механизмов сделано на фиг. 281. Из фиг. 281, а, б видим, что в точке А имеем  $M_b = M_R$ . Если бы двигатель ускорился и перешел на новую скорость  $n_b' > n_A$ , то его вращающий момент  $M_b$  сделался бы меньше  $M_R$ , и двигатель, очевидно, стал бы затормаживаться и вернулся бы к скорости  $n_A$ . Наоборот, при снижении скорости вращения до значения  $n_b'' < n_A$  двигатель развивал бы электромагнитный момент вращения, превышающий  $M_R$ , и стал бы увеличивать свою скорость до значения  $n_b = n_A$ , когда  $M_b = M_R$ . Таким образом, параллельный двигатель с падающей скоростной характеристикой в рассматриваемых случаях механических характеристик рабочего механизма всегда устойчив.

На фиг. 282 сделано такое же сопоставление механических характеристик рабочих механизмов с возрастающей механической характеристикой параллельного двигателя. Рассуждения, аналогичные предыдущим, приводят к обратному результату, а именно, что в этом случае работа параллельного двигателя будет неустойчивой. В самом деле, при возрастании  $n_b$  вращающий момент двигателя возрастает и становится больше  $M_R$ , вследствие чего его скорость вращения все увеличивается, и он идет, как говорят, «в разнос». При уменьшении скорости двигателя от равновесного положения (когда  $M_b = M_R$ ) вращающий момент двигателя  $M_b$  становится меньше  $M_R$ , вследствие чего двигатель начинает затормаживаться до полной остановки. Таким образом, при возрастающей механической характеристике параллельного двигателя и при обычных механических характеристиках рабочих механизмов (фиг. 282, а и б) параллельный двигатель не может работать устойчиво.

Можно представить себе частный случай, когда при возрастающей механической характеристике параллельного двигателя рабочий механизм имеет механическую характеристику, также возрастающую, но такую, что при  $n_b > n_A$  имеем  $M_R > M_b$ , а при  $n_b < n_A$  имеем  $M_R < M_b$ . В этом частном случае (фиг. 282, в) рассуждениями, аналогичными предыдущим, убеждаемся, что параллельный двигатель будет работать устойчиво. Однако это будет частный случай, а так как проектируемый параллельный двигатель для широкого промышленного применения должен работать устойчиво при всех встречающихся на практике механических характеристиках рабочих механизмов, то параллельные двигатели нужно проектировать так, чтобы их механические



Фиг. 282. Сопоставление возрастающей механической характеристики параллельного двигателя постоянного тока с разными механическими характеристиками механизмов.

характеристики были падающими, а для этого их скоростные характеристики должны быть падающими, как это указывалось выше в § 191, п. «а».

Таким образом, фактически возможный случай возрастающей скоростной характеристики (фиг. 272, кривая 3) практически неприемлем.

### 193. Основные рабочие характеристики и устойчивость работы последовательного двигателя постоянного тока

а) Скоростная характеристика последовательного двигателя. В последовательном двигателе по возбуждающей обмотке проходит ток якоря  $I_a$ ; вследствие этого уравнение (453) можем переписать так:

$$n_b = C_n \frac{U - I_{ab} R_\Sigma}{\Phi_b} = C_n \frac{U - I_{ab} R_\Sigma}{\varphi(I_{ab})}. \quad (468)$$

Здесь  $R_\Sigma$  включает и сопротивление  $R_s$  последовательной обмотки возбуждения.

Возьмем последовательный двигатель, для которого вследствие малости падения напряжения в цепи якоря можно, в первом приближении, считать  $I_{ab} R_\Sigma \approx 0$ , кроме того, предположим, что двигатель совершенно не насыщен и что можно принять  $\Phi_b = \Phi_a = \varphi(I_{ab}) = c I_{ab}$ . В этом случае (468) можно переписать так:

$$n_b = C_n \frac{U}{c I_{ab}} = C_n' \frac{U}{I_{ab}} = \frac{C}{I_{ab}}, \quad (469)$$

где

$$C = \frac{C_n U}{c} = \text{const.}$$

Выражение (469) представляет собой уравнение гиперболы, отнесенное к осям асимптот. Таким образом, если, исходя на фиг. 283 из точки А, соответствующей номинальному току якоря  $I_{ab} = I_N$  при номинальном напряжении,

начать менять нагрузку двигателя в ту и в другую сторону, т. е. менять ток  $I_{ab}$  то скорость двигателя  $n_b$  будет изменяться по равнобокой гиперболе. На фиг. 283 ток по оси абсцисс и скорость по оси ординат отложены, соответственно, в долях номинального тока ( $I_{ab}/I_N$ ) и в долях номинальной скорости вращения ( $n_b/n_N$ ).

Возьмем теперь другой последовательный двигатель, имеющий ту же номинальную скорость вращения  $n_N$ , и предположим, что для него падением напряжения в цепи якоря пренебречь нельзя. Очевидно, что теперь при увеличении тока  $I_{ab}$  (на фиг. 283 увеличение  $I_{ab}/I_N$ ) скоростная характеристика будет лежать на фиг. 283 ниже кривой 1, наоборот, при уменьшении  $I_{ab}$  (т. е. при уменьшении  $I_{ab}/I_N$ ) скоростная характеристика ляжет выше кривой 1, кривая 2.

Теперь предположим, что падение напряжения  $I_{ab}R_\Sigma \approx 0$ , но двигатель насыщен. В этом случае поток  $\Phi_b$  не будет пропорционален току и при возрастании тока поток  $\Phi_b$  будет нарастать медленнее тока. Тогда, совмещая на фиг. 283 точку номинальной скорости двигателя с точкой А, мы будем получать при токах, превышающих  $I_N$ , кривую, которая будет лежать выше кривой 1.

При наличии падения напряжения  $I_{ab}R_\Sigma$  и реакции якоря (насыщенная магнитная система) оба фактора будут сказываться на скоростной характеристике во взаимно обратных направлениях, вследствие чего скоростная характеристика последовательного двигателя будет приближаться к кривой 1, т. е. к равнобокой гиперболе.

Из фиг. 283 следует, что скоростная характеристика последовательного двигателя при токах, близких к нулю, будет, теоретически говоря, стремиться к бесконечности. В действительности ток  $I_{ab}$  не может сделаться равным нулю, так как по мере увеличения скорости вращения механические потери в двигателе будут возрастать; все же скорость при холостом ходе получит значение, опасное для механической прочности двигателя, а поэтому для обычного последовательного двигателя холостой ход и небольшая нагрузка недопустимы. Отсюда следует, что без нагрузки последовательный двигатель пускать нельзя.

Построение скоростной характеристики последовательного двигателя по кривой намагничивания (х г. х. х. в пересчитанном масштабе) и по характеристическому треугольнику (определенному для номинального тока якоря  $I_N$  по внешней нагрузочной характеристике в режиме генератора с независимым возбуждением) можно выполнить тем же способом, который был применен выше для параллельного двигателя.

Строим в первом квадранте прямую  $U - I_{ab}R_\Sigma$ , в третьем квадранте — кривую намагничивания, а в четвертом квадранте — прямую реакции якоря  $\overline{OD}$  (фиг. 284). Пусть  $\overline{OB} = I_N$ ; тогда ток возбуждения  $I_s = I_N = \overline{OB}$ . На кривой намагничивания  $\overline{OF} = \overline{OB} = I_s$ . Вследствие наличия реакции якоря действительные намагничивающие ампервитки будут равны  $\overline{OH} = \overline{OF} - \overline{FH}$ , где  $\overline{FH} = \overline{BD}$  — размагничивающие ампервитки якоря  $pAW_r$ . Ампервиткам  $\overline{OH}$  соответствует магнитный поток двигателя  $\Phi_b = \overline{HK}$ , причем э. д. с., генерируемая им,

$$E_b = U - I_N R_\Sigma$$

выразится отрезком  $\overline{BC}$ . Таким образом,

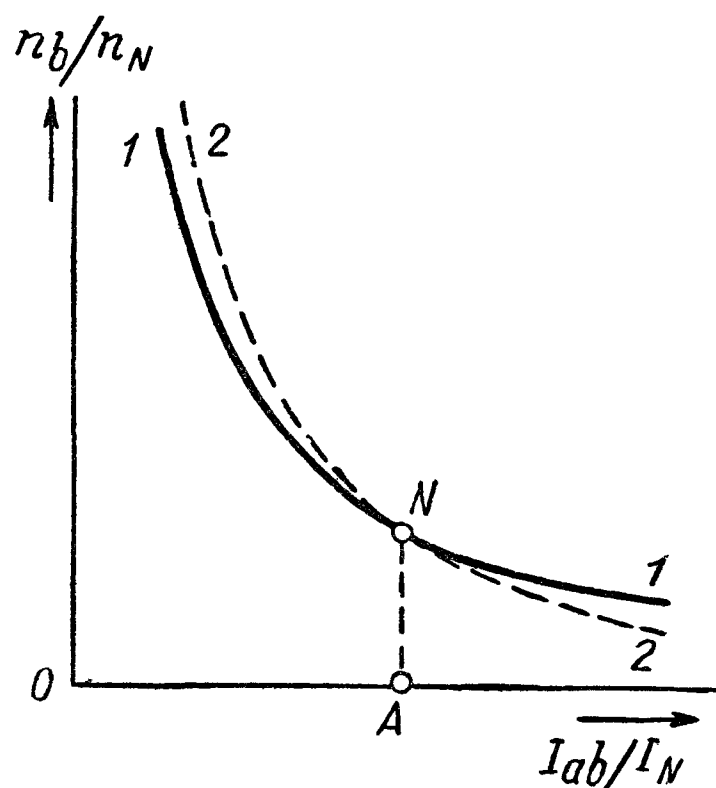
$$n_b = C_n \frac{E_b}{\Phi_b} = C_n \frac{\overline{BC}}{\overline{HK}} \equiv \frac{\overline{BC}}{\overline{HK}} \equiv \frac{\overline{OM}}{\overline{OL}}.$$

Выбрав масштаб для скорости вращения, откладываем  $n_b = \overline{ON}$  и строим первую точку характеристики  $P$ . Таким же способом находим для другого значения тока якоря  $I_{ab}' = \overline{OB}'$  соответствующие значения э. д. с. и магнитного потока, а именно:  $E_b = \overline{B'C'}$  и  $\Phi_b = \overline{H'K'} = \overline{OL'}$ ; тогда

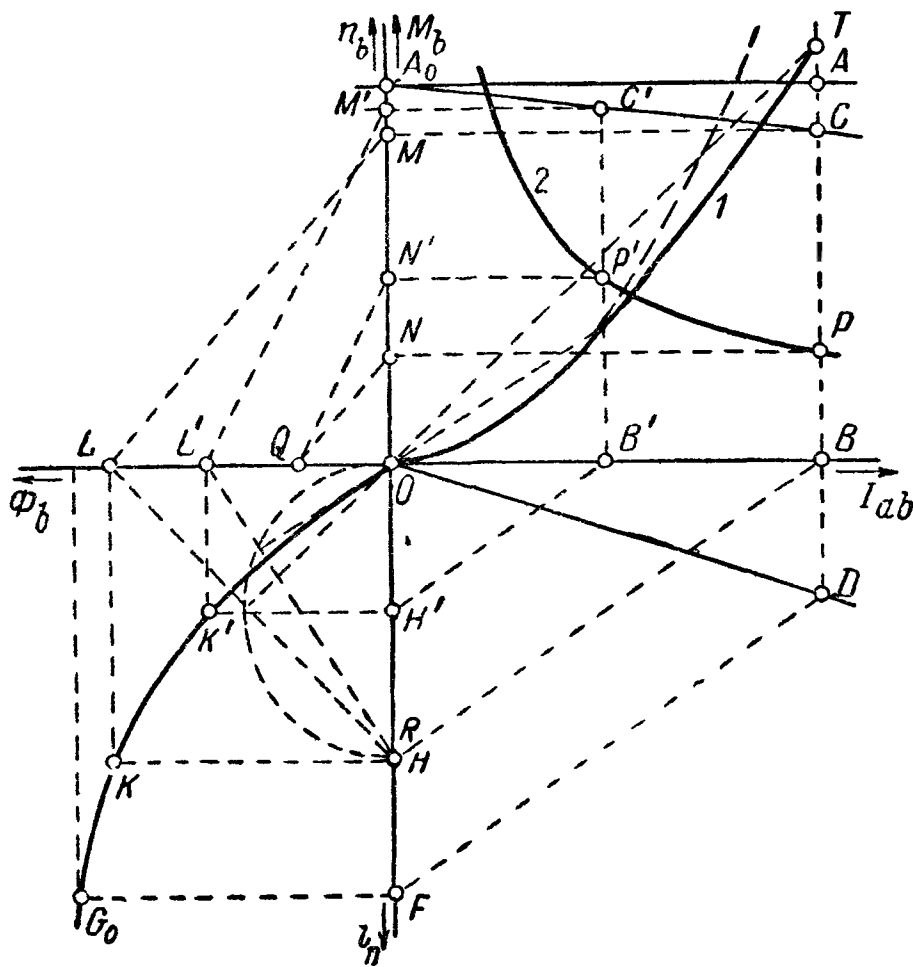
$$n_b = C_n \frac{\overline{B'C'}}{\overline{OL'}}.$$

Нанеся это значение скорости вращения в ранее выбранном для нее масштабе на фиг. 284, получим другую точку  $P'$  характеристики  $n_b = f(I_{ab})$ .

Эту точку можно построить, не производя вычислений по формуле. Для этого из  $N$  проводим



Фиг. 283. Скоростные характеристики последовательных двигателей постоянного тока при разных предположениях.



Фиг. 284. Построение скоростной и моментной характеристик параллельного двигателя постоянного тока

$\overline{NQ} \parallel \overline{ML}$ , а из  $Q$  — линию  $\overline{QN'} \parallel \overline{L'M'}$ . Проведя линию  $\overline{N'P'} \parallel \overline{OB}$ , находим  $P'$  в пересечении с вертикалью через данное значение  $I_{ab} = \overline{OB'}$ . Таким же способом находим и другие точки характеристики  $n_b = f(I_{ab})$ .

б) Моментная характеристика последовательного двигателя постоянного тока. Моментная характеристика для последовательного двигателя (458) перепишется при помощи (455) так.

$$M_b = C_m \Phi_b I_{ab} = C_m \varphi(I_{ab}) I_{ab}.$$

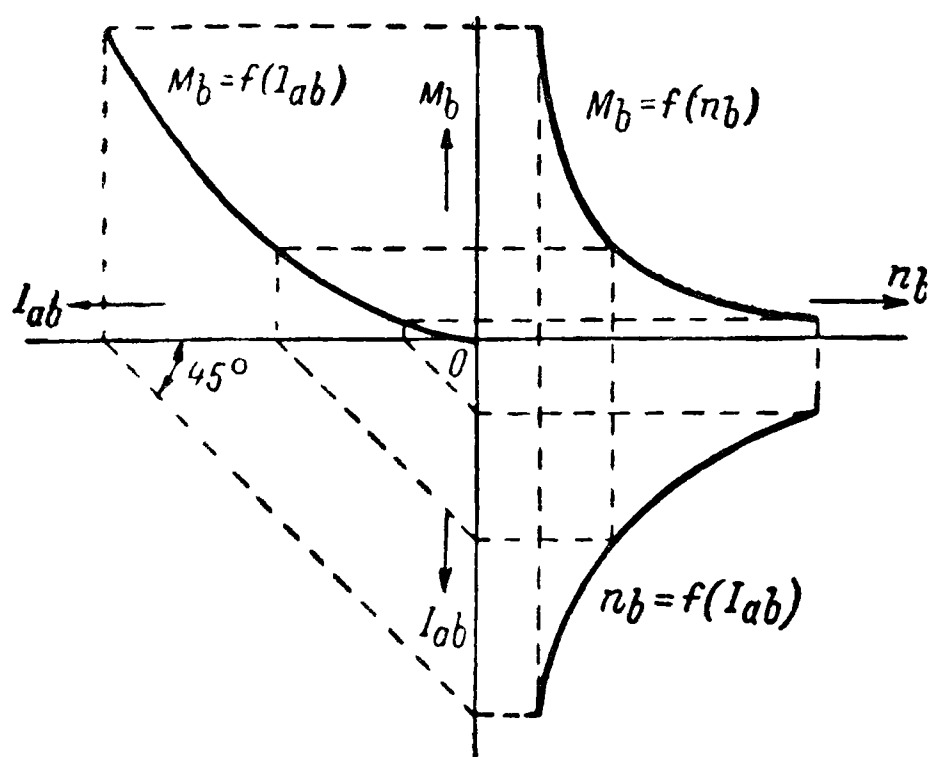
Если двигатель не насыщен, то можем принять, что  $\varphi(I_{ab}) = c I_{ab}$ , тогда

$$M_b = C_m c I_{ab}^2 = C_m' I_{ab}^2, \quad (470)$$

где  $C_m' = C_m c = \text{const}$ . Уравнение (470) является уравнением параболы, поэтому можем сказать, что моментная характеристика последовательного двигателя в первом приближении имеет параболический вид. Так как некоторое насыщение магнитной системы всегда имеется, то действительная моментная характеристика последовательного двигателя по мере увеличения тока  $I_{ab}$  будет ложиться ниже параболы, представленной на фиг. 284 пунктиром. При очень большом насыщении можем принять  $\Phi_b \approx \text{const}$ , и тогда зависимость  $M_b = f(I_{ab})$  будет приближаться к пропорциональности току  $I_{ab}$ , т. е. кривая будет приближаться к прямой, пересекающей ось ординат выше начала координат.

Построение моментной характеристики по кривой намагничения и характеристичному треугольнику выполнено на фиг. 284 так же, как в § 191 это было сделано для параллельного двигателя.

в) **Механическая характеристика.** Так как последовательный двигатель имеет резко падающую скоростную характеристику, то его механическая ха-



Фиг. 285. Скоростные и механические характеристики последовательного двигателя постоянного тока.

рактеристика получает всегда падающий характер (фиг. 285), поэтому относительно устойчивости его работы вопрос никогда не возникает, она всегда обеспечена.

#### 194. Сравнение скоростных характеристик параллельного и последовательного двигателей постоянного тока

На практике параллельный двигатель постоянного тока обычно называют шунтовым двигателем, а последовательный — сериесным. Скоростные характеристики этих двигателей настолько резко отличаются друг от друга, что по сопоставлению с ними стали называть шунтовыми и сериесными

и двигатели переменного тока, независимо от схемы включения их принципиальных обмоток. Во избежание этой неувязки мы считаем целесообразным называть двигатели постоянного тока с параллельным включением якорной и возбуждающей обмотки параллельными, а с последовательным включением этих обмоток — последовательными, термины же «шунтовая» (слегка падающая) и «сериесная» (резко падающая) сохранить для обозначения вида скоростных характеристик этих двигателей и вообще всех двигателей, по степени сходства их скоростных характеристик с указанными скоростными характеристиками двигателей постоянного тока.

#### 195. Возможные схемы включения возбуждающих обмоток и основные рабочие характеристики двигателей смешанного возбуждения

Устраивая в параллельном двигателе постоянного тока дополнительную обмотку возбуждения и включая ее последовательно с обмоткой якоря, мы получим либо двигатель согласно-смешанного возбуждения, либо двигатель встречно-смешанного возбуждения, в зависимости от того, включена ли дополнительная последовательная обмотка возбуждения согласно с основной параллельной возбуждающей обмоткой или ей навстречу. Согласно включение получим, если оно выполнено так, что м. д. с. обеих возбуждающих обмоток складываются (действуют согласно, в одну и ту же сторону); если обе возбуждающие обмотки включены так, что их м. д. с. действуют друг другу навстречу, получаем встречное включение.

Точно так же можно построить последовательный двигатель постоянного тока с дополнительной параллельной возбуждающей обмоткой, включенной с основной последовательной возбуждающей обмоткой либо согласно, либо встречно.

а) Согласно-смешанное включение обеих возбуждающих обмоток получило на практике за последние 15—20 лет большое применение с целью обеспечения устойчивой работы параллельных двигателей. Дело в том, что с целью получения двигателей с повышенным коэффициентом полезного действия делают сопротивление цепи якоря небольшим, а с целью уменьшения размеров двигателя магнитную систему делают насыщенной. Вследствие



этого возникает опасение, что скоростная характеристика их будет возрастающей, а следовательно, двигатель получит неустойчивую, возрастающую механическую характеристику (§ 192)

Устраивая дополнительную согласно включенную последовательную возбуждающую обмотку с небольшим числом витков, добиваются определенно падающей скоростной характеристики двигателя. Такие двигатели постоянного тока сохраняют характеристики параллельных двигателей; на практике их называют поэтому шунтовыми (параллельными) «со слабой последовательной возбуждающей обмоткой». Последнюю иногда называют по выполняемой ею роли стабилизирующей возбуждающей обмоткой, а двигатели — стабилизированными (параллельными) двигателями постоянного тока

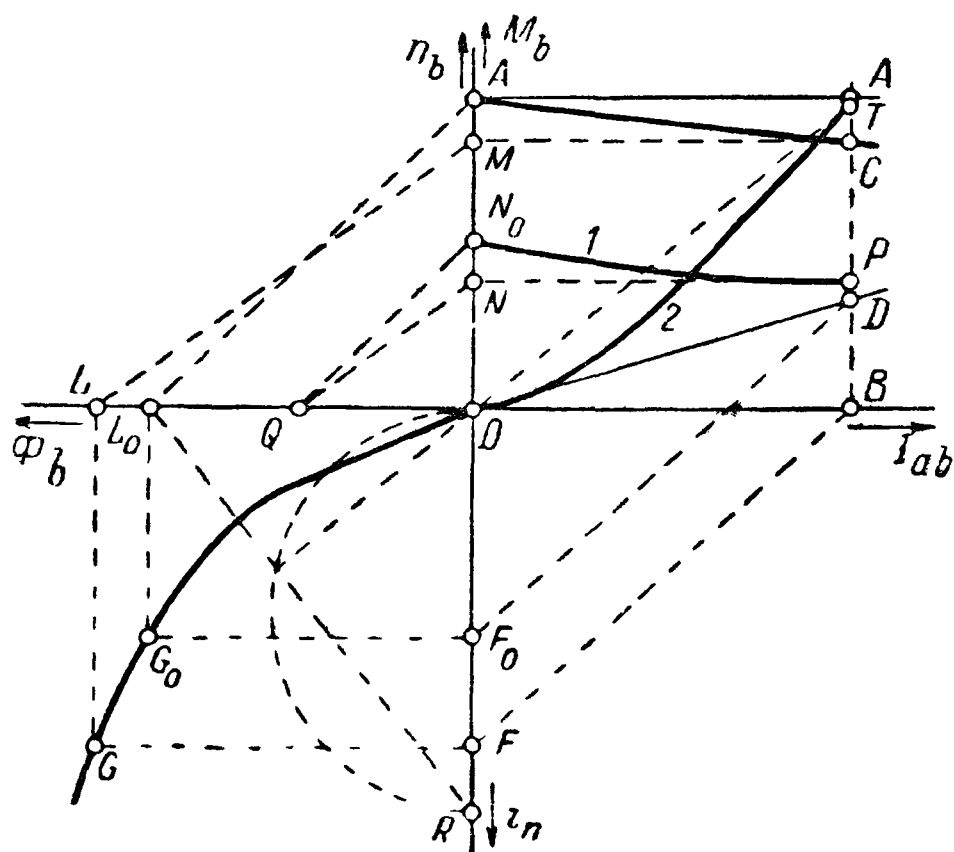
Отметим, что всесоюзная серия ПН параллельных двигателей спроектирована со стабилизирующими обмотками, кроме двигателей наименьшей мощности типа ПН 2,5. Концы стабилизирующей обмотки выводят на доску зажимов для облегчения ее переключения, так как для изменения направления вращения двигателя ток в якоре должен изменить свое направление, а ток в стабилизирующей обмотке должен сохранить прежнее направление

б) Параллельные двигатели постоянного тока со встречной последовательной возбуждающей обмоткой применяют на практике редко, лишь в специальных случаях, так как обычно процентное понижение скорости параллельных двигателей при номинальной нагрузке бывает небольшим, а уменьшение его грозит переходом к возрастающей скоростной характеристике, делающей работу такого двигателя неустойчивой.

в) Последовательные двигатели постоянного тока со встречно включенной дополнительной параллельной возбуждающей обмоткой на практике не строят, так как того же эффекта — уменьшения результирующего потока двигателя — можно добиться более простым средством, а именно, включая соответствующий реостат параллельно к последовательной возбуждающей обмотке. Это средство широко используется для регулирования скорости вращения последовательных двигателей (§ 204, п. «б»).

г) Последовательные двигатели постоянного тока с согласно включенной дополнительной параллельной возбуждающей обмоткой применяют на практике в тех случаях, когда по условиям эксплуатации двигатель может оказаться при малой нагрузке или без нее (холостой ход). В этом случае дополнительная параллельная возбуждающая обмотка рассчитывается таким образом, чтобы ограничить скорость холостого хода определенным пределом, допустимым по условиям механической прочности двигателя, при этом двигатель сохраняет свои свойства последовательного двигателя.

д) Построение скоростной характеристики по кривой намагничивания (х. г. х. х., снятой при независимом возбуждении и пересчитанной на магнитный поток) и по характеристическому треугольнику (определенному для  $I_{ab} = I_N$  по внешней нагрузочной характеристике в генераторном режиме с независимым возбуждением) выполнено на фиг. 286. Оно отличается от построения на фиг. 284 лишь тем, что теперь линия  $\overline{OD}$  должна быть проведена



Фиг. 286. Построение характеристик двигателя согласно-смешанного возбуждения.

таким образом, чтобы отрезки  $\overline{BD}$  были пропорциональны разности ампер-витков  $p (AW_r - AW_s)$ . При отрицательных значениях этой разности отрезок  $\overline{BD}$  будет лежать вверх от оси абсцисс, как это показано на фиг. 286. Как видим, скоростная характеристика сохраняет в этом случае свой серийный характер, но при холостом ходе  $n_b$  не получает чрезмерных значений, не приемлемых по условиям механической прочности двигателя.

На той же фиг. 286 построена для согласно-смешанного двигателя и моментная характеристика, она аналогична такой же характеристике серийного двигателя.

## 196. Сравнение свойств двигателей постоянного тока разных возбуждений и области их практического применения

Незначительная зависимость скорости вращения параллельных двигателей от их нагрузки делает их незаменимыми во всех тех случаях, когда требуется возможно большее постоянство скорости вращения. Так как при этом параллельные двигатели допускают простую и экономичную регулировку скорости вращения в широких пределах, то этим и объясняется то исключительное распространение, которое они получили на практике. К достоинствам параллельных двигателей нужно отнести также плавный и не требующий никаких видоизменений схемы соединений переход от генераторного к двигательному режиму. Недостатком параллельных двигателей является зависимость тока возбуждения, а следовательно, и потока от напряжения сети; это затрудняет применение их в тех установках, где требуется значительный вращающий момент, и в то же время имеют место резкие снижения напряжения.

Последовательный двигатель может развивать большой вращающий момент при перегрузках, что является результатом почти квадратичной зависимости его вращающего момента от тока (в случае слабого насыщения магнитной цепи этой машины), в то время как у параллельного двигателя вращающий момент изменяется только в первой степени от тока якоря. Это свойство последовательных двигателей имеет особенное значение в тех случаях, когда требуется пуск двигателей под нагрузкой. Другое свойство последовательных двигателей, а именно снижение скорости вращения с увеличением нагрузки, также является ценным для некоторых приводов. Благодаря ему работа последовательных двигателей в условиях сильно меняющейся нагрузки вызывает меньшие толчки тока в сети. Наконец, в противоположность параллельным двигателям, понижение напряжения сети совершенно не отражается на величине вращающего момента последовательного двигателя, оно влияет только на скорость вращения. К недостаткам последовательных двигателей надлежит отнести, во-первых, отсутствие экономического способа регулирования скорости вращения в сторону ее понижения от номинальной и, во-вторых, свойство чрезмерно повышать свою скорость вращения при минимальных нагрузках, что делает невозможным пуск их вхолостую. По этой причине в установках с последовательными двигателями надлежит избегать ременной передачи, так как ремень может соскочить со шкива. Последовательные двигатели нашли себе преимущественное распространение в эл. тяге и в крановых установках, а также в приводах насосов, вентиляторов и т. п., где не требуется регулирования скорости вращения и исключена возможность работы без нагрузки.

Встречно-смешанные двигатели постоянного тока обладают еще большим постоянством скорости вращения при изменении нагрузки, чем параллельные двигатели. Однако они применяются сравнительно редко, так как параллельные двигатели практически держат скорость удовлетворительно, а кроме того, в тех случаях, когда нагрузка меняется быстро и в больших пределах, работа встречно-смешанных двигателей получается неустойчивой.

На практике чаще применяют согласно-смешанный двигатель, а именно в тех случаях, когда требуется, чтобы двигатель развивал большой вращающий момент и вместе с тем предъявляется требование, чтобы при сбросе нагрузки скорость не вышла за допустимый предел. Согласно включенная последовательная обмотка применяется иногда с целью увеличения начального вращающего момента двигателя, обычно работающего в качестве параллельного (стабилизирующая обмотка).

### 197. Схемы включения двигателей постоянного тока и пускорегулирующая аппаратура

Как было отмечено, для того чтобы двигатель вращался в нужную сторону, нужно знать, как должно быть выполнено соединение обмотки возбуждения с обмоткой якоря. Если это неизвестно, то приходится делать пробный пуск наугад и в случае неудачи производить переключение концов либо якоря, либо (что проще) обмотки возбуждения. В двигателе с добавочными полюсами нужно знать, кроме того, как соединить с якорем обмотку добавочных полюсов, а в случае наличия компенсационной обмотки, как приключить ее.

На практике необходимое направление вращения заказываемого двигателя задается заказчиком. Чтобы не возникало недоразумений, в ГОСТ 183-41 указано, что

«правым вращением машины с горизонтальным валом и односторонним приводом считается вращение по часовой стрелке, а левым — против часовой стрелки, если смотреть со стороны присоединения к первичному двигателю (в случае генератора) или к рабочему механизму (в случае двигателя). В прочих, более сложных случаях способ определения направления вращения устанавливается заводом-изготовителем»

В ряде случаев двигателя, выпускаемые заводами, имеют на корпусе (у подшипника) нанесенную краской стрелку, указывающую принятое направление вращения. С этим направлением должны быть согласованы соединения концов обмоток для составления правильной схемы электрических соединений.

По ГОСТ 183-41 концы обмоток должны иметь обозначения, приведенные в табл. 19.

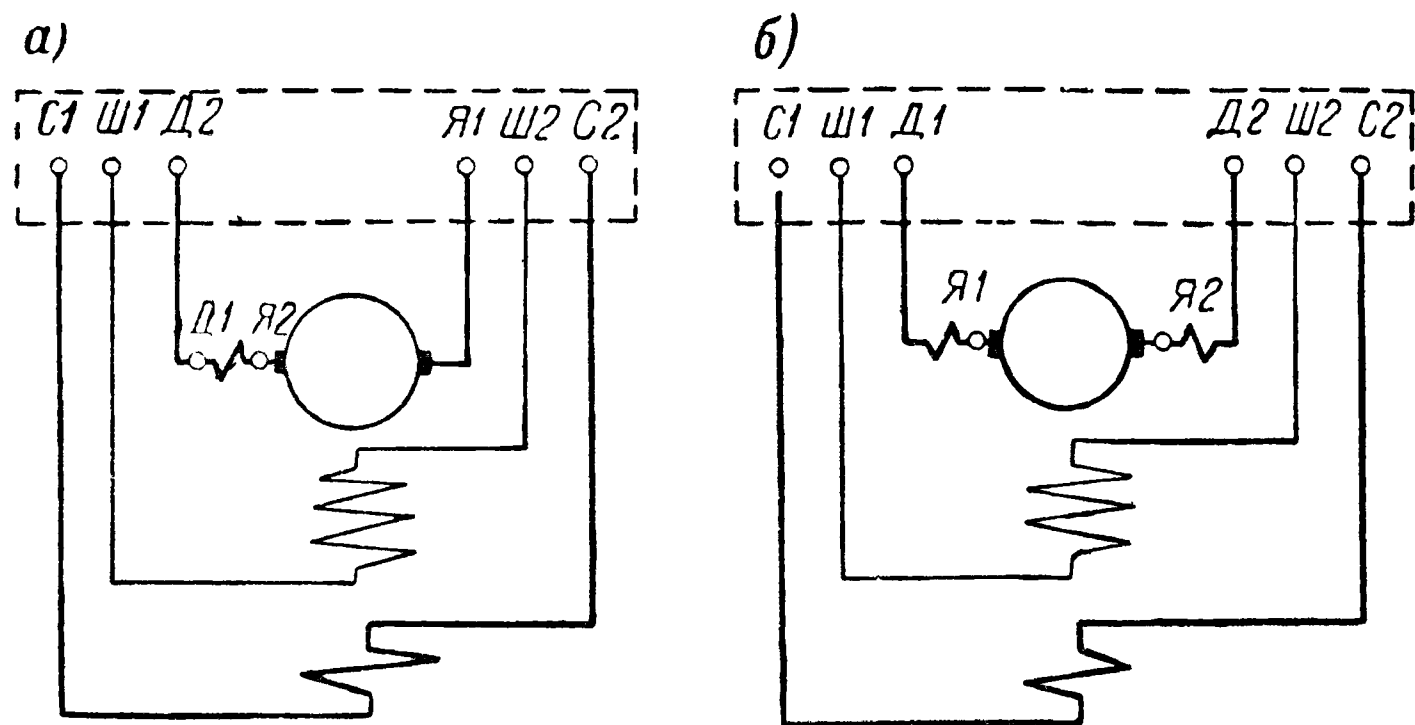
Таблица 19

Название обмотки	Начало обмотки	Конец обмотки
Обмотка якоря . . . . .	<i>Я1</i>	<i>Я2</i>
Компенсационная обмотка . . . . .	<i>К1</i>	<i>К2</i>
Обмотка добавочных полюсов . . . . .	<i>Д1</i>	<i>Д2</i>
Серийная обмотка . . . . .	<i>С1</i>	<i>С2</i>
Шунтовая обмотка . . . . .	<i>Ш1</i>	<i>Ш2</i>
Пусковая обмотка . . . . .	<i>П1</i>	<i>П2</i>
Уравнительная обмотка . . . . .	<i>У1</i>	<i>У2</i>
Обмотка особого назначения . . . . .	<i>О1</i>	<i>О2</i>

Примечания 1 Концы обмоток, соединенные между собою внутри машины и не выведенные наружу, не обозначаются 2. Назначение особой обмотки указывается заводом-изготовителем.

Направление тока в обмотке добавочных полюсов (и в компенсационной обмотке, если она имеется) должно быть согласовано с направлением тока в обмотке якоря таким образом, чтобы м. д. с. их были направлены навстречу м. д. с. якоря. Правильное последовательное взаимосоединение всех этих трех обмоток устанавливается заводом-изготовителем в процессе изготовления двигателя и делается внутри машины, так что на доску зажимов двигателя от всей этой цепи выводятся всего два зажима: *Я1* и *Д2* (фиг. 287, а). Зажимы

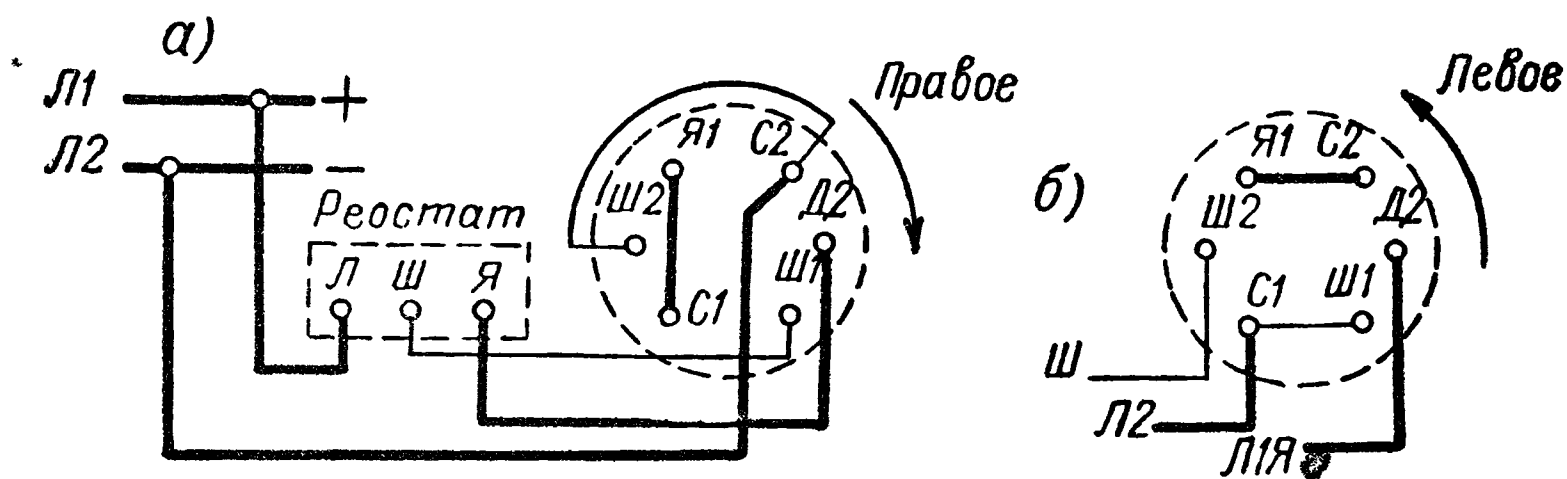
обмоток возбуждения также выводятся на доску зажимов, так как их соединение с зажимами *Я1* и *Д2* зависит от принятого направления вращения двигателей. Схема соединений обычно наклеивается на внутренней поверхности крышки, которой прикрывается коробка выводов двигателя, крышка открыта снизу для подвода проводов. Если обмотки добавочных полюсов разбиты на две части, приключенные к зажимам якоря, то тогда к зажимам доски подво-



Фиг. 287. Схемы внутренних соединений параллельных двигателей постоянного тока.

дят зажимы *Д1* и *Д2*, вследствие чего схема соединений принимает вид, показанный на фиг. 287, б.

На фиг. 288 показана схема соединений, которую нужно осуществить при пользовании пусковым реостатом с тремя зажимами для получения пра-



Фиг. 288. Монтажные схемы пуска в ход параллельных двигателей постоянного тока

вого и для получения левого вращения. Буквами *Л1* и *Л2* обозначены зажимы сети (линии), к которой присоединяется двигатель.

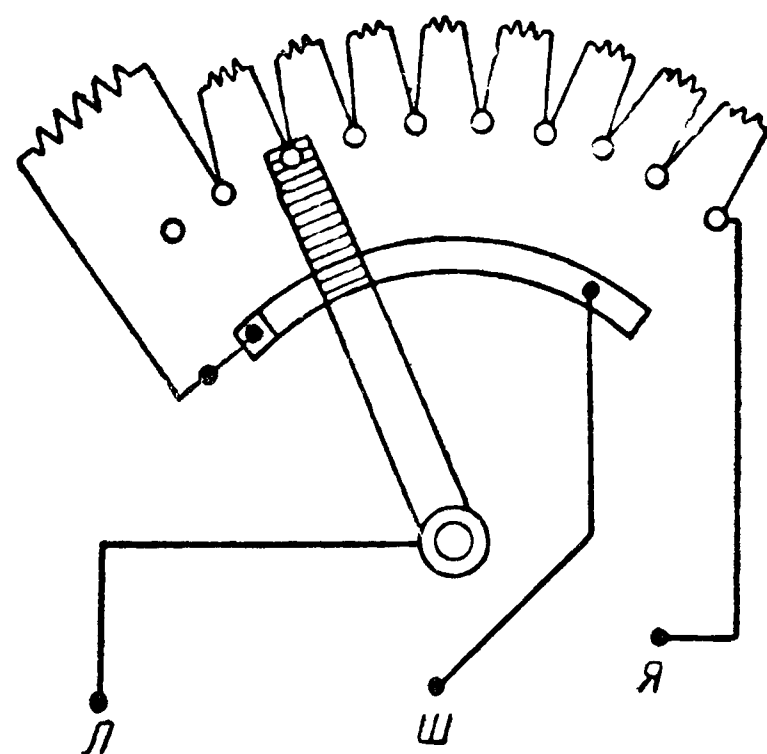
Зажимы трехконтактного пускового реостата для пуска параллельных двигателей указаны на фиг. 288, а. Здесь через *Л* обозначен зажим, который должен быть соединен с плюсовым, положительным зажимом сети. Зажим реостата *Я* нужно соединить с зажимом *Д2* (конец цепи якоря). При правом вращении двигателя зажим якоря *Я1* нужно соединить с зажимом *С1* последовательной (стабилизирующей) обмотки возбуждения, а конец этой обмотки *С2* — со вторым зажимом сети *Л2* (минусовой, отрицательный зажим). Таким образом, соединение цепи якоря осуществлено; соединение осуществляется «толстыми» проводами, т. е. проводами, рассчитанными на длительное прохождение номинального тока якоря.

Переходим к составлению соединений цепи параллельной обмотки возбуждения, которые делаем «тонкими» проводами, т. е. имеющими сечение, соответствующее номинальному току параллельной обмотки. Зажим *Ш* трех-



контактного пускового реостата получает, при постановке рукоятки реостата на первый (пусковой) контакт, электрическое соединение с зажимом реостата  $Л$ , который соединен внешним проводом с зажимом сети  $Л1$ . Таким образом, начиная составление схемы цепи параллельной обмотки с зажима реостата  $Ш$ , мы фактически начинаем с зажима сети  $Л1$ . Соединив зажим реостата  $Ш$  с началом обмотки возбуждения, т. е. с зажимом машины  $Ш1$ , мы должны от второго зажима этой обмотки  $Ш2$  присоединиться к зажиму сети  $Л2$ , но так как он соединен при правом вращении двигателя с зажимом цепи якоря  $С2$  (конец цепи якоря), то соединяем  $Ш2$  с  $С2$ . Таким образом, схема для правого вращения двигателя готова. Изменение соединений, необходимое для получения левого вращения двигателя, показано на фиг. 288, б. Для этого изменяем направление тока в параллельной и одновременно в последовательной (стабилизирующей) обмотке.

Схема составлена без регулировочного реостата в параллельной цепи возбуждения и без приборов. Регулировочный реостат и амперметр цепи возбуждения можем включить в схему для правого вращения (фиг. 288, а) либо в провод  $Ш-Ш1$ , либо в провод  $Ш2-С2$ , а в схеме для левого вращения (фиг. 288, б) — в провод  $Ш-Ш2$  (или в провод  $Ш1-С1$ ). Амперметр для измерения тока якоря следует включать (в схеме для правого вращения) в провод  $Я1-С1$  (либо в провод  $Я-Д2$ ); если включить его в провод  $Л1-Л$ , то он будет измерять сумму тока якоря  $I_a$  и тока цепи параллельной обмотки  $i_n$ . Вольтметр следует подключать либо к зажимам сети  $Л1$  и  $Л2$ , либо к зажимам цепи якоря  $Я1$  и  $Д2$ , если хотим исключить падение напряжения в контактах пускового реостата.



Фиг. 289. Трехконтактный пусковой реостат для пуска в ход параллельного двигателя постоянного тока.

На фиг. 289 показана принципиальная схема трехконтактного реостата. При передвижении вправо рукоятки реостата (из непроводящего материала) скользящий медный контакт, приделанный к рукоятке снизу, одновременно подводит ток к контактам якорной цепи и к дужке, соединенной с зажимом  $Ш$ , т. е. осуществляет присоединение на полное напряжение цепи обмотки возбуждения. При этом, чтобы получить максимальный ток возбуждения, регулировочный реостат должен быть полностью выведен. Так как ток якоря на первом якорном контакте определяется сопротивлением пускового реостата, то при этих условиях получим наибольший возможный пусковой вращающий момент двигателя  $M = C_m \Phi_n I_{ab}$ , а следовательно, наибольший избыточный (ускоряющий) вращающий момент при данном моменте сопротивления.<sup>1</sup>

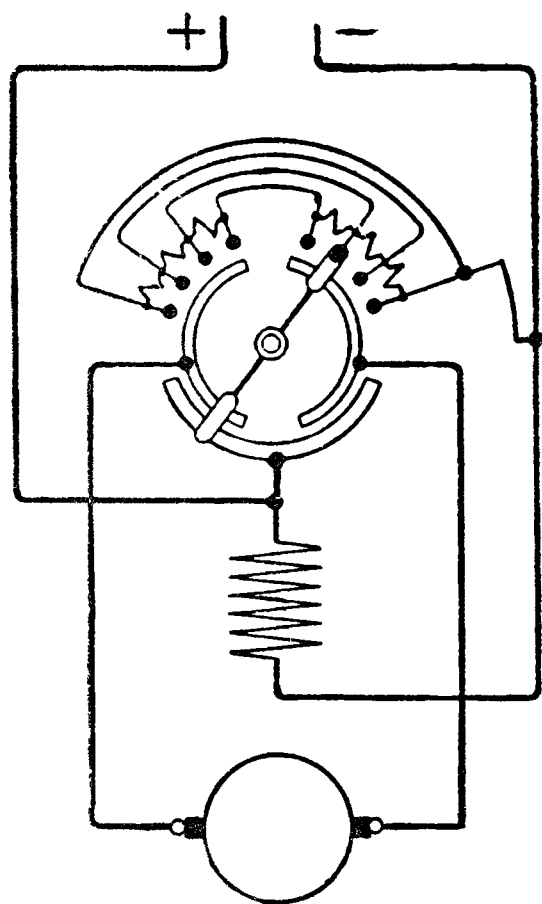
Для того чтобы при выключении пускового реостата не происходило разрыва цепи возбуждения, что может повлечь за собой перенапряжение в обмотке возбуждения и ее пробой, контактный сектор (дужку) соединяют с первым контактом пускового реостата (фиг. 289). Вследствие этого обмотка возбуждения после выключения пускового реостата оказывается замкнутой на якорь и пусковой реостат; разрыва обмотки возбуждения не происходит. Конструкции пусковых реостатов довольно разнообразны. На фиг. 290 показана схема пускового реостата для реверсирования двигателя. Реверсирование осуществляется обычно изменением тока в цепи якоря, а не в цепи обмотки

<sup>1</sup> Заметим, что при покое двигателя трение в его подшипниках и в приводимом механизме в несколько раз больше, чем при движении.

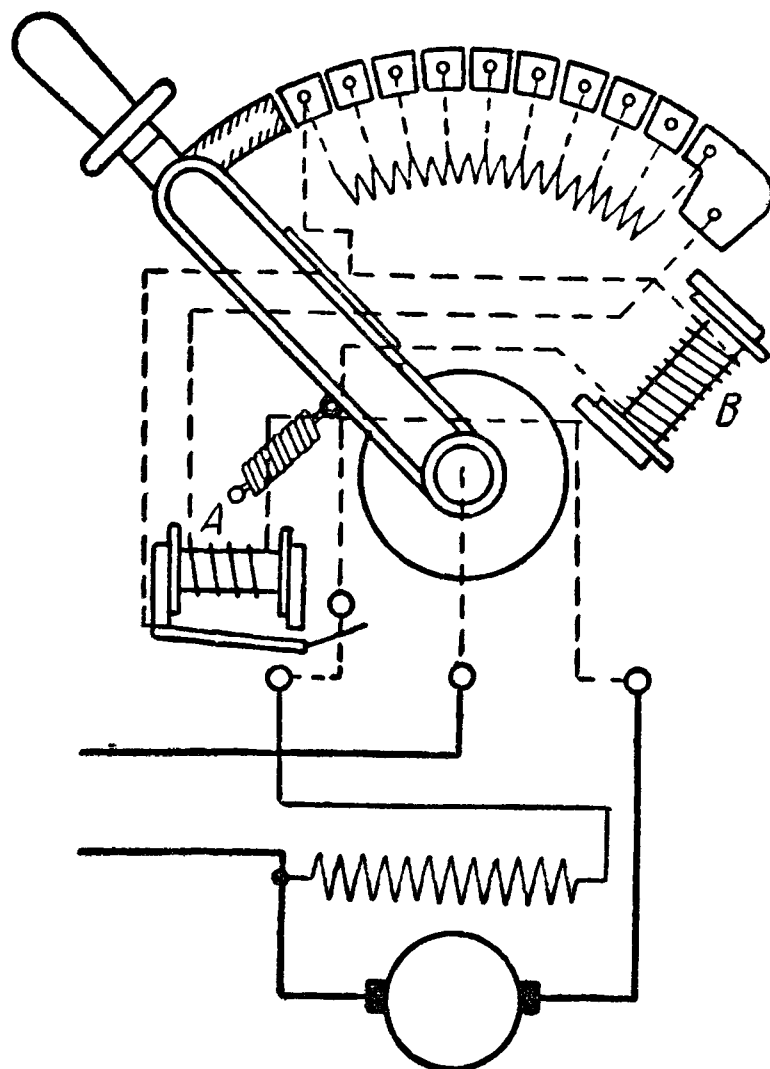


возбуждения, так как индуктивность обмотки якоря значительно меньше. Такие реостаты применяют только для небольших двигателей; реверсирование больших двигателей осуществляется обычно контроллерами.

На фиг. 291 показана схема пускового реостата с встроенными реле максимального тока (максимальное реле *A*) и минимального напряжения (нулевое реле *B*). Цель последнего — устранить возможность пуска в ход двигателя без пускового реостата, что может случиться, если произойдет остановка двигателя вследствие перерыва в снабжении энергией. Если своевременно не ввести пускового сопротивления, то при возобновлении подачи энергии покоя-



Фиг 290. Схема пускового реостата для реверсирования небольшого по мощности параллельного двигателя постоянного тока



Фиг 291. Пусковой реостат с встроенными максимальными реле *A* и минимальным (нулевым) реле *B*

щийся двигатель окажется включенным на сеть без пускового сопротивления, что вызовет перегорание предохранителей. Цель максимального реле — разомкнуть цепь якоря и остановить двигатель в случае недопустимо большой перегрузки двигателя.

Если нулевое реле включить в цепь обмотки возбуждения так, как показано на фиг. 291, то получим, кроме того, предохранение двигателя на случай разрыва цепи возбуждения. Как видно из фиг. 291, рычаг реостата снабжен сильной пружиной, которая стремится поставить его на холостой контакт. При работе двигателя рычаг притянут к электромагниту нулевого реле *B*. При разрыве цепи возбуждения или при исчезновении в ней тока, вследствие перерыва электроснабжения, электромагнит перестает притягивать рычаг, и он под влиянием пружины быстро приходит в холостое положение.

Максимальное реле *A* действует таким образом, что при превышении тока якоря двигателя сверх допустимого значения якорь реле притягивается к электромагниту *A* и шунтирует при этом обмотку нулевого реле *B*, и вследствие исчезновения в нем тока рычаг *C* под действием пружины становится в холостое положение. На фиг. 291 обмотка нулевого реле включена в цепь обмотки возбуждения; в двигателях с широкой регулировкой скорости (с широким изменением тока возбуждения) ее лучше приключить непосредственно к сети. Иногда максимальное и нулевое реле объединяют, снабжая электромагнит реле двумя обмотками, действующими навстречу друг другу. Имеются и другие видоизменения указанных защит.

## Б. ПУСК В ХОД ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

198. Необходимость пускового реостата в схеме пуска в ход двигателей постоянного тока и случаи, когда допустим безреостатный пуск в ход двигателей

а) При номинальной нагрузке двигателя постоянного тока и работе его от сети с номинальным напряжением  $U_N$  напряжение это, приложенное к цепи якоря, равно обратной э. д. с.  $E_b$ , пропорциональной скорости вращения  $n_N$ :

$$E_b = \frac{p n_N}{60} \Phi_b \frac{N}{a} \cdot 10^{-8},$$

к сумме падений напряжения в цепи якоря от номинального тока якоря  $\Delta U_N = I_N R_\Sigma$ ; здесь  $R_\Sigma$  — сумма сопротивлений: якоря  $R_a$ , всех последовательно с ним включенных обмоток (обмотки добавочных полюсов  $R_w$ , компенсационной обмотки  $R_c$ , если она имеется, последовательной возбуждающей обмотки  $R_s$ , если она имеется) и контакта щеток  $R_B$ . Поэтому можем написать:

$$U_N = E_b + I_N R_\Sigma = E_b + \Delta U.$$

Если якорь включить непосредственно в сеть, когда он пребывает в покое и когда, следовательно, его обратная э. д. с.  $E_b = 0$ , то по якорю должен пройти такой ток  $I_{a0}$ , который создал бы падение напряжения, уравновешивающее напряжение сети  $U_N$ . Для этого случая можем написать:

$$U_N = I_{a0} R_\Sigma.$$

Очевидно, что ток  $I_{a0}$  будет во столько раз больше  $I_N$ , во сколько раз  $U_N$  больше  $\Delta U$ :

$$\frac{I_{a0}}{I_N} = \frac{U_N}{\Delta U_N},$$

откуда

$$I_{a0} = I_N \frac{U_N}{\Delta U_N} = I_N \frac{1}{\Delta U_N / U_N}.$$

Так как  $\Delta U_N / U_N$  составляет всего от 0,02 до 0,10 от  $U_N$ , то пусковой ток достигает значений:

$$I_{a0} = I_N \frac{1}{(0,02 \div 0,10)} = (50 \div 10) I_N. \quad (471)$$

Для двигателей постоянного тока такие большие значения начального пускового тока  $I_{a0}$  недопустимы, а потому, чтобы избежать их, нужно при пуске двигателя включить в цепь якоря такое добавочное сопротивление  $R_p$  (пусковой реостат), чтобы ограничить начальный пусковой ток двигателя допустимым значением.

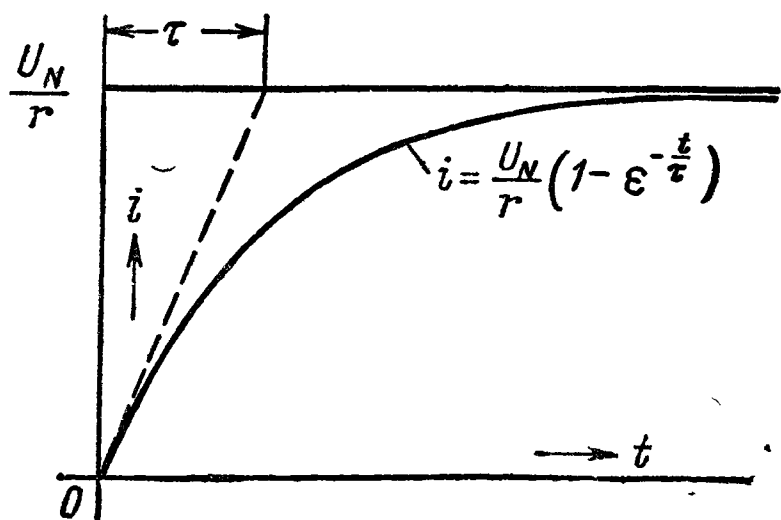
Тогда для начального момента пуска двигателя в ход можем написать следующее уравнение равновесия э. д. с. в цепи якоря:

$$U_N = I_{a0} (R_\Sigma + R_p). \quad (472)$$

При легких условиях пуска ток  $I_{a0}$  ограничивают обычно значением номинального тока  $I_N$  или половиной номинального тока  $\frac{1}{2} I_N$ ; при тяжелых пусках допускают  $I_{a0} = 1,5 I_N$ . Руководствуясь этим соображением, выби-

рают начальное сопротивление  $R_0$  пускового реостата. Как только по якорю пройдет ток  $I_{a0}$ , сейчас же от взаимодействия его с результирующим магнитным потоком двигателя  $\Phi_b$  создается электромагнитный вращающий момент  $M_b$ . Если он будет больше момента сопротивления при покое, то двигатель придет во вращение, вследствие чего в его цепи якоря появится э. д. с.  $E_b$ . Предположим, что мы пускали двигатель под током  $I_{a0} = I_N$ , а момент сопротивления  $M_T$  после нарушения покоя составлял всего  $0,5 M_b$  и от скорости не зависит. Очевидно, что двигатель достигает скорости вращения, при которой  $M_b = M_R = \frac{1}{2} M_{bN}$ , т. е. ток якоря упадет до значения  $0,5 I_N$ .

После этого мы можем вывести из цепи якоря часть сопротивления  $R_e$ , с тем, чтобы ток якоря вновь достиг номинального значения. При этом вновь получим преобладание электромагнитного вращающего момента  $M_b$  над моментом сопротивления  $M_R$ , и двигатель вновь начнет ускоряться. Поступая таким же образом, мы постепенно выведем  $R_0$ , и двигатель достигнет скорости вращения, которую он должен иметь при нагрузке имеющимся моментом сопротивления. Пусковой реостат, очевидно, должен быть разбит на несколько секций, величина которых определяется соответствующим расчетом.



Фиг. 292. Экспонентная кривая тока.

При пуске в ход параллельных двигателей необходимо, чтобы параллельная обмотка возбуждения была включена на полное напряжение сети, т. е. из ее цепи должен быть выведен полностью регулировочный реостат.

Пуск в ход последовательных двигателей, как уже отмечалось, допустим только под нагрузкой, при которой их скорость вращения  $n$  не достигнет недопустимого значения, обычно не более  $1,5 n_N$ .

б) Безреостатный пуск в ход двигателей постоянного тока допустим в двух случаях: 1) небольших двигателей (на мощности не более одного киловатта), имеющих относительно большое падение напряжения в цепи якоря, вследствие чего снижается начальный пусковой ток до допустимой величины, и 2) больших двигателей, обладающих большой индуктивностью цепи якоря и если они не приносят в пусковой период больших маховых масс. Компромиссным решением является пуск двигателей постоянного тока по схеме грубого включения, состоящей во включении в цепь двигателя либо одноступенчатого реостата, либо одноступенчатой реактивной катушки, которые по завершении пуска закорачивают.

Возможность первого случая применения безреостатного пуска ясна из ранее приведенных соображений и в комментариях не нуждается. Возможность второго случая основана на том, что большая самоиндукция создает замедление во времени нарастания пускового тока. Ток нарастает по экспонентной кривой (фиг. 292), и если приводимые двигателем во вращение маховые массы невелики, то разворачивание двигателя будет идти так быстро, что вследствие нарастания обратной э. д. с. ток не успеет достигнуть того большого значения, которое он достиг бы при включении застопоренного (не могущего вращаться) якоря.

в) В установках с большими параллельными двигателями, питаемыми от специальных предназначенных для них параллельных генераторов постоянного тока, надобность в пусковом реостате также отпадает, так как имеется возможность понижать напряжение на зажимах якоря двигателя путем регулирования напряжения питающего генератора. При этом, очевидно,

возбуждающая обмотка пускового двигателя должна иметь независимое питание для того, чтобы при пуске была возможность установить в двигателе полный основной магнитный поток  $\Phi_n$

### 199. Уравнение движения двигателя в процессе пуска в ход

Это уравнение можно составить, исходя из следующих соображений. Пусть мгновенное значение вращающего момента, развиваемого двигателем, будет  $M_{bt}$ , а мгновенное значение тормозящего момента (момента сопротивления) будет  $M_{Rt}$ . Разность их составит ускоряющий момент вращения  $M_{ut}$

$$M_{ut} = M_{bt} - M_{Rt}, \quad (473)$$

который пойдет на приращение живой силы вращающихся частей.

Обозначим момент инерции всех движущихся частей, приведенный к валу двигателя, через  $J$ , а мгновенное значение угловой скорости двигателя через  $\omega_t$ :

$$\omega_t = 2\pi n_t, \quad (474)$$

где  $n_t$  — скорость вращения в оборотах в единицу времени в данный момент времени  $t$ . Запасенная двигателем кинетическая энергия  $A$  напишется так:

$$A = \frac{1}{2} J \omega_t^2. \quad (475)$$

Противодействующий момент  $M_{jt}$ , оказываемый вращающимися частям двигателя за счет запасенной ими кинетической энергии, можно написать так:

$$M_{jt} = \frac{1}{\omega_t} \frac{dA}{dt} = J \frac{d\omega_t}{dt}. \quad (476)$$

Для любого момента времени в процессе пуска двигателя в ход имеем.

$$M_{ut} = M_{jt}, \quad (477)$$

или, подставляя (473) и (476):

$$M_{bt} - M_{Rt} = J \frac{d\omega_t}{dt}. \quad (478)$$

Это и будет уравнением движения двигателя в процессе пуска. По достижении двигателем установившейся скорости,  $\omega_t = \omega_N = \text{const}$ , получим:

$$\frac{d\omega_t}{dt} = \frac{d\omega_N}{dt} = 0,$$

в связи с чем уравнение (478) примет вид:

$$M_b - M_R = 0, \text{ или } M_b = M_R,$$

где  $M_b$  и  $M_R$  — установившиеся значения электромагнитного и тормозящего моментов вращения.

## В. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 200. Возможные способы регулирования скорости вращения двигателей постоянного тока

Как следует из выражения для скорости вращения двигателей постоянного тока (453):

$$n_b = C_n \frac{U - I_{ab} R_\Sigma}{\Phi_b},$$

принципиально возможны следующие три способа регулирования скорости: 1) изменением подведенного напряжения  $U$ , 2) изменением магнитного потока  $\Phi_b$ , 3) изменением падения напряжения  $I_{ab}R_\Sigma$  в цепи якоря. В большинстве случаев двигатели включаются в сеть неизменного напряжения,  $U = \text{const}$ , поэтому для них возможны только второй и третий способы регулирования скорости. При этом следует различать двигатели нормальной конструкции, каковых подавляющее число, и небольшие двигатели специальной конструкции.

Рассмотрение способов регулирования скорости целесообразно сделать отдельно применительно к\* каждому типу двигателей, различающихся по способам соединения возбуждающей обмотки (или возбуждающих обмоток, если их две) с обмоткой якоря.

## 201. Способы регулирования скорости вращения обычных параллельных\* двигателей постоянного тока, работающих от сети неизменного напряжения

а) Способ регулирования скорости вращения и з м е н е н и е м п о т о к а в о з б у ж д е н и я — основной способ регулирования скорости параллельных двигателей, благодаря которому они получили столь широкое применение.

Магнитный поток машины, согласно (454), равен:  $\Phi_b = \Phi_n - \Delta\Phi_b$ ; в параллельных двигателях с добавочными полюсами (а следовательно, со щетками, стоящими на геометрической магнитной нейтрали)  $\Delta\Phi_b$  — величина, изменяющаяся незначительно с ростом нагрузки. По этой причине, желая изменить  $\Phi_b$ , нужно изменять  $\Phi_n$  путем изменения тока возбуждения, т. е. при неизменном напряжении  $U = \text{const}$  нужно изменять сопротивление цепи обмотки возбуждения. Это достигается включением в эту цепь регулировочного сопротивления  $r_b$  (регулировочный реостат). Так как ток обмотки возбуждения составляет в параллельных двигателях незначительную долю (2—5%) тока якоря, то потери в реостате относительно малы, и такой регулировочный реостат получается небольших размеров и стоит недорого. Достоинством этого способа является и то, что при неизменном сопротивлении  $r_b$ , включенном в цепь возбуждения, параллельный двигатель сохраняет свои шунтовые свойства, т. е. малое изменение скорости вращения при изменении нагрузки

Недостатком способа является невозможность уменьшения скорости вращения ниже значения, получаемого при полностью выведенном реостате, т. е. при обмотке возбуждения, включенной непосредственно на напряжение сети  $U = \text{const}$ . При этом, так как при продолжительной работе обмотка возбуждения нагревается примерно на  $60^\circ \text{C}$ , то сопротивление ее возрастет примерно на  $0,004 \cdot 60 = 0,24$  (здесь 0,004 — температурный коэффициент сопротивления меди), и ток возбуждения падает примерно в таком же отношении, а скорость вращения возрастает. Отсюда следует, что если нужно поддерживать некоторую заданную минимальную скорость вращения, то обмотка возбуждения должна быть так рассчитана, чтобы эта скорость получалась при нагретой обмотке возбуждения при введении в цепь возбуждения такого сопротивления, чтобы при нагревании обмотки была возможность путем выведения этого сопротивления поддерживать неизменным ток возбуждения. При этом нужно учесть возрастание от нагревания сопротивления цепи якоря, что ведет к некоторому снижению скорости вращения, но это снижение незначительно вследствие того, что падение напряжения в цепи якоря невелико по сравнению с  $U$ .

Другим недостатком данного способа при широком регулировании скорости является плохое использование двигателя при малых скоростях вращения, если двигатель должен развивать при всех скоростях неизменный момент вращения. Это следует непосредственно из выражения для момента вращения (458):  $M_b = C_m \Phi_b I_{ab}$ . Действительно, при  $M_b = \text{const}$  и работе двига-



теля с повышенной скоростью вращения, т. е. при ослабленном магнитном потоке  $\Phi_b$ , ток в якоре должен расти обратно пропорционально изменению  $\Phi_b$ , т. е. приблизительно пропорционально скорости вращения двигателя. На этот ток якоря, следовательно, и должен быть рассчитан двигатель. Тогда при малых скоростях вращения, а следовательно, при больших значениях  $\Phi_b$ , двигатель при том же  $M_b = \text{const}$  будет потреблять уменьшенный ток  $I_{ab}$ , т. е. будет использован плохо.

Допустимое повышение скорости вращения параллельного двигателя определяется его механической прочностью и условиями безискровой коммутации. Обычные параллельные двигатели, предназначенные для работы при определенной скорости вращения, должны допускать по ГОСТ 183-41 повышение скорости на 20%. Если в механическом отношении прочность достаточна, то по коммутационным условиям двигателя с добавочными полюсами допускают некоторое повышение скорости вращения по сравнению с номинальной скоростью. В каталожных данных двигателей массового изготовления обычно указывается максимальная допускаемая скорость вращения для каждого типа двигателя.

Естественно, что чем большее изменение скорости вращения вверх от номинальной требуется от параллельного двигателя, тем дороже двигатель. Практически параллельные двигатели с добавочными полюсами можно построить для регулирования скорости в пределах до 1 : 6, однако они получаются относительно большими и с плохим к. п. д. Обычно строят параллельные двигатели для следующих пределов регулирования: 1 : 1,5; 1 : 2 и 1 : 3.

б) Регулирование скорости путем изменения падения напряжения в цепи якоря осуществляется путем включения в цепь якоря регулируемого сопротивления  $R_e$  (якорный регулирующий реостат). Так как пусковые реостаты рассчитываются лишь на кратковременное прохождение по ним пускового тока, то для регулирования скорости вращения двигателя указанным способом они неприменимы. Приходится конструировать особые реостаты, допускающие длительное прохождение по ним номинального тока; такие реостаты получают значительные размеры и стоят относительно дорого. Рассматриваемое регулирование скорости вращения параллельного двигателя возможно, очевидно, только в сторону ее снижения от номинальной скорости вращения.

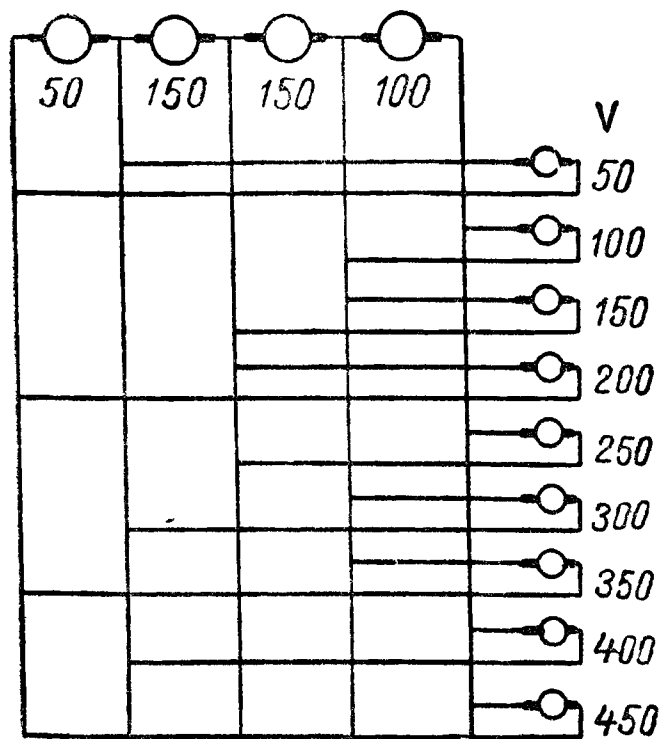
Вследствие больших потерь в якорном реостате этот способ весьма не экономичен. При неизменном токе возбуждения к. п. д. двигателя уменьшается почти пропорционально уменьшению скорости вращения, так, при уменьшении скорости в 2 раза около половины подведенной к двигателю мощности теряется в якорном реостате. Кроме того, при изменяющейся нагрузке и неизменном сопротивлении  $R_e$  двигатель теряет свои шунтовые свойства (небольшое изменение скорости), а именно. с увеличением нагрузки скорость вращения падает тем резче, чем больше введенное сопротивление  $R_e$ .

На практике этот способ регулирования скорости параллельных двигателей применяется редко, лишь в особых установках и преимущественно в дополнение к первому способу, когда требуется кратковременное значительное снижение скорости ниже той, которую можно получить при первом способе регулирования.

## 202. Способы регулирования скорости вращения обычных параллельных двигателей постоянного тока изменением подводимого напряжения

а) Ступенчатое регулирование скорости вращения параллельных двигателей. Этот способ получил применение в эпоху преимущественного применения в промышленности двигателей постоянного тока в связи с многопроводной системой распределения энергии постоянного тока, в частности, на отделочных текстильных предприятиях, требовавших регулирования скорости до 1 : 10.

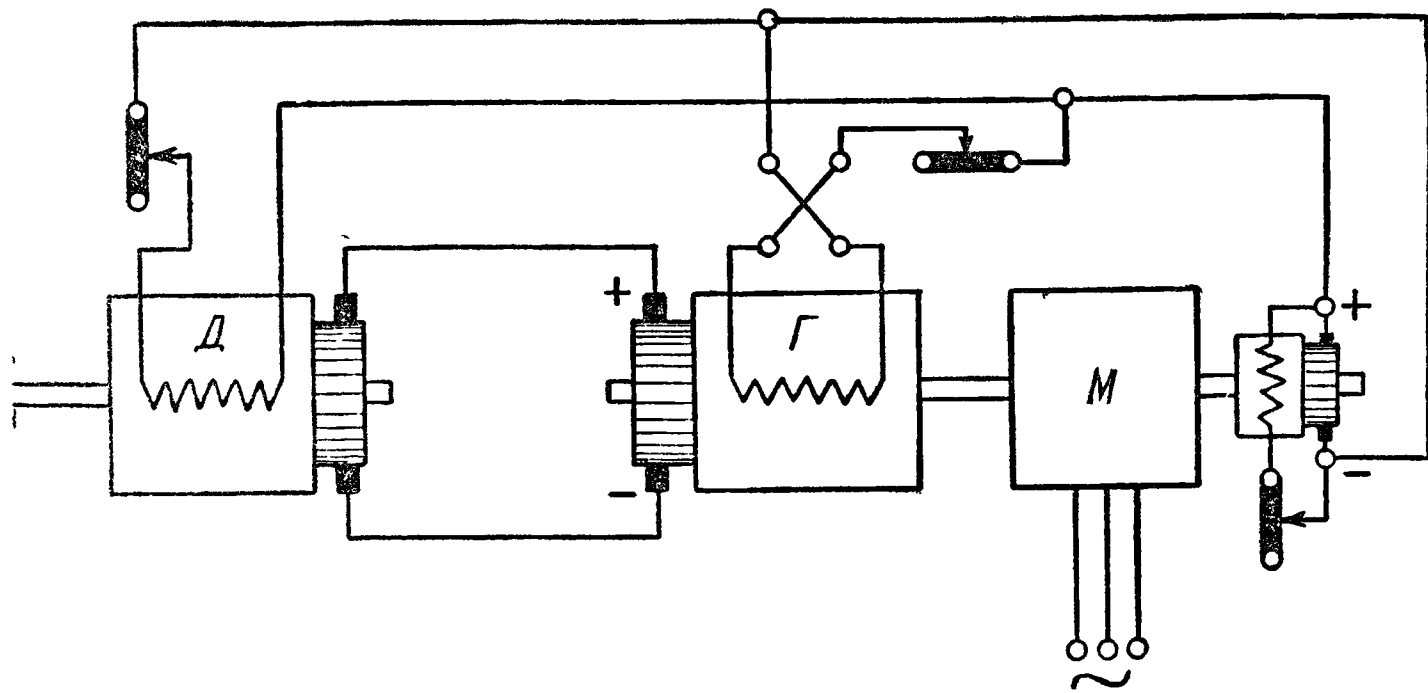
На фиг. 293 показана схема создания пятипроводной системы постоянного тока путем последовательного соединения четырех генераторов постоянного тока, рассчитанных на напряжение 50; 150; 150 и 100 в при одном и том же токе якоря. При помощи специального переключающего устройства (контроллера) двигатель можно последовательно включать, как показано на фигуре, на разные ступени напряжения, т. е. на разные ступени скорости.



Фиг. 293. Пятипроводная система постоянного тока.

б) Плавное регулирование скорости в широких пределах (от нуля) можно получить при применении специального генератора для питания параллельного двигателя. Такой способ регулирования скорости используется в установках, требующих широкого предела изменения скорости и частых реверсов (вращения в взаимно обратных направлениях). Способ был разработан и нашел широкое применение для крупных параллельных двигателей прокатных металлургических установок и для шахтных подъемников в горно-рудной промышленности и носит название (по имени предложившего его системы Леонарда. Позднее система Леонарда нашла себе применение и для небольших двигателей в разных областях промышленности.

В системе Леонарда зажимы якорей генератора  $G$  и двигателя  $D$  соединяются непосредственно без всяких пусковых и регулировочных реостатов (фиг. 294). Обмотки возбуждения генератора и двигателя получают независимое возбуждение от общего возбuditеля (или от самостоятельных возбу-



Фиг. 294. Система регулирования скорости двигателя по схеме Леонарда.

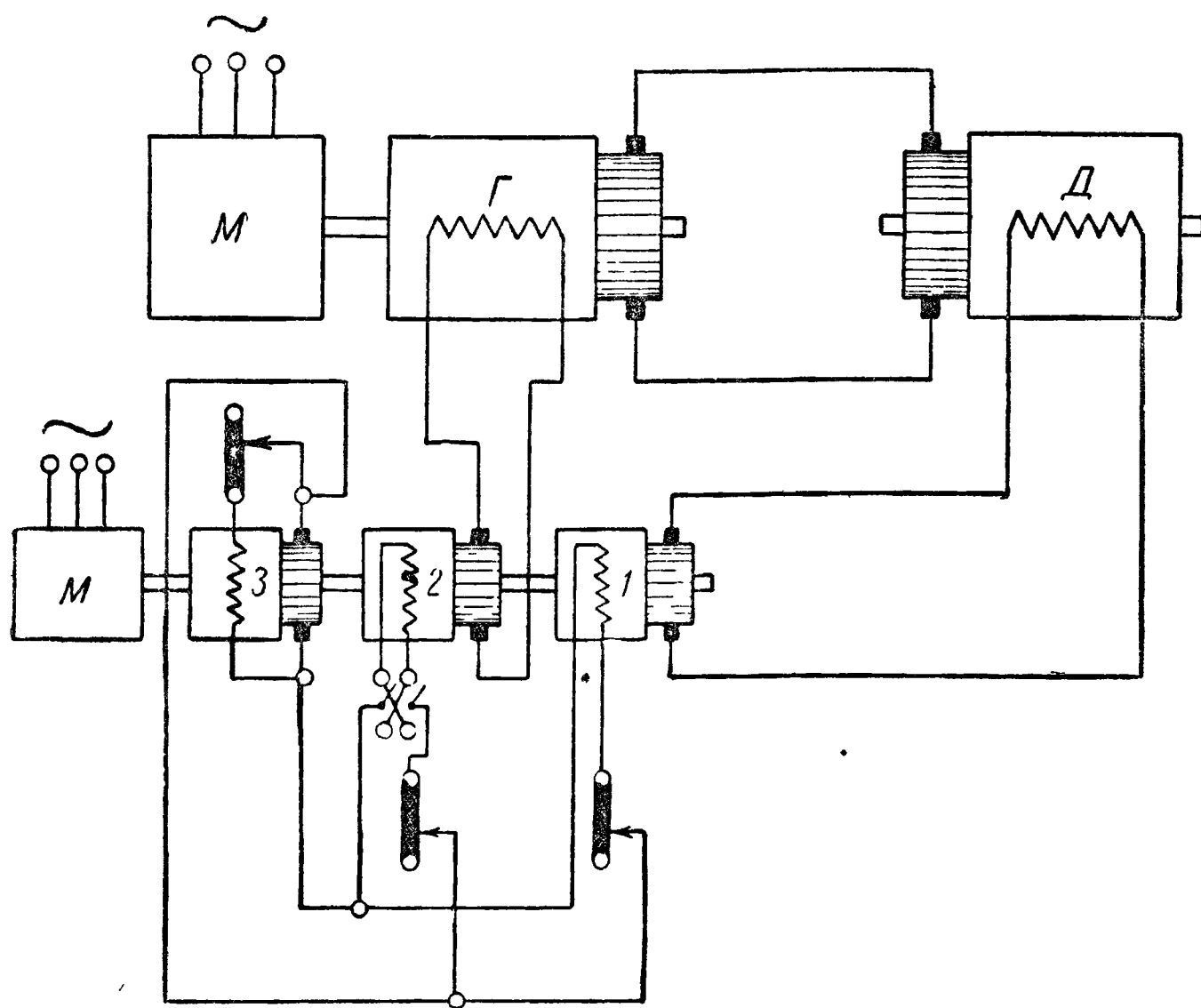
дителей), сидящего на валу генератора. Последний приводится во вращение в современных установках двигателем переменного тока  $M$  (либо синхронным, либо асинхронным, в зависимости от мощности установки и от условий ее работы).

Пуск в ход и регулирование скорости осуществляется регулированием напряжения генератора путем воздействия на реостат в его цепи возбуждения. Если к регулированию скорости двигателя изменением напряжения генератора добавить регулирование скорости реостатом в цепи возбуждения двигателя, то наибольший предел регулирования по системе Леонарда доходит до 1 : 20 по отношению к максимальной скорости двигателя.

Меняя направление тока в обмотке генератора, можно осуществить изменение полярности его зажимов и, следовательно, изменение полярности зажимов двигателя. Вследствие этого изменяется направление тока в якоре двигателя при сохранении направления тока в цепи возбуждения двигателя,

следовательно, изменяется направление его вращения, т. е. производится реверсирование двигателя.

Таким образом, в отличие от параллельного двигателя обычного питания от сети с неизменным напряжением, при котором реверс двигателя производится переключением либо зажимов его якоря, либо зажимов его возбуждения, в системе Леонарда это достигается изменением направления тока в обмотке возбуждения генератора, питающего двигатель. Очевидно, что при этом питание возбуждения генератора должно быть независимым и осуществляться либо от возбудителя, сидящего на валу генератора, либо от отдельно расположенного агрегата возбуждения.



Фиг. 295. Квадратичная система Леонарда.

Стоимость установки по системе Леонарда значительно больше стоимости установки обычного параллельного двигателя с приключением его к сети с неизменным напряжением ( $U = \text{const}$ ); однако при большом числе пусков и реверсов в час выигрыш в затрате энергии и в быстроте и легкости манипуляции, а также экономия в пусковом реостате и прочей аппаратуре оказываются весьма существенными; это сделало систему Леонарда наиболее пригодной для условий работы в прокатных установках тяжелой металлургии и шахтных подъемниках.

При большом числе реверсов в час в установках с мощными двигателями (порядка 5000 *квт*) реостаты в цепи возбуждения регулируемого параллельного двигателя и питающего его параллельного генератора становятся громоздкими, и управление ими становится затруднительным. В таких случаях от обычной системы Леонарда переходят к так называемой квадратичной системе Леонарда (фиг. 295).

Последняя отличается от обычной тем, что как генератор, так и двигатель системы Леонарда имеют отдельные возбудители с независимым возбуждением от общего вспомогательного возбудителя, причем все три возбудителя имеют привод от общего асинхронного двигателя, образуя таким образом независимый возбудительный агрегат. Зажимы якорей возбудителя 1 главного параллельного двигателя и возбудителя 2 параллельного генератора соединяются непосредственно с соответствующими обмотками возбуждения, без всяких реостатов. Регулирование установки осуществляется реостатами в цепях возбуждения возбудителей, которые присоединяются к цепи якоря

самовозбуждающегося вспомогательного возбудителя 3, работающего при неизменном напряжении.

При этой системе регулируемые токи значительно уменьшаются, в связи с чем уменьшаются размеры регулировочных реостатов и их стоимость, а главное, значительно облегчается управление регулированием вследствие уменьшения регулируемых токов. Если токи возбуждения возбудителя составляют 3% от токов возбуждения главного параллельного двигателя и питающего его генератора, то регулируемые токи уменьшаются в 33 раза.

### 203. Способы регулирования скорости вращения специальных регулируемых параллельных двигателей постоянного тока

Под специальными регулируемыми параллельными двигателями, работающими от неизменного напряжения ( $U = \text{const}$ ), понимаются двигатели, предназначенные для работы от сети с неизменным напряжением и допускающие широкую регулировку скорости вращения, которую нельзя рационально осуществить в двигателях обычной конструкции. Такие двигатели получают конструктивные особенности, отличающие их от обычных двигателей. По конструктивным особенностям их можно разделить: 1) на параллельные двигатели с изменяемым числом витков якоря и 2) на параллельные двигатели с изменяемой проводимостью для магнитного потока возбуждения. В основном их выполняют на небольшие мощности. Ниже кратко приводятся некоторые примеры специальных регулируемых параллельных двигателей.

а) Регулирование скорости путем изменения числа витков якоря осуществляется устройством на якоре двух одинаковых обмоток, каждая со своим коллектором. Включая оба якоря последовательно, а затем параллельно, можно получить две ступени скорости с отношением скоростей 1 : 2. На каждой ступени скорости можно осуществить регулировку скорости путем изменения реостатом тока возбуждения.

б) Регулирование скорости путем изменения проводимости для главного магнитного потока обмотки возбуждения  $\Phi_n$  осуществимо в двух вариантах. В первом варианте изменения проводимости якорь двигателя выполняется конической формы, причем специальной передачей его можно смещать в осевом направлении относительно полюсов. Применяя и регулировку реостатом потока возбуждения, удастся достигнуть регулировки скорости вращения в отношении 1 : 10. В другом варианте изменение проводимости главного магнитного потока достигается изменением магнитной проводимости полюсных сердечников. Для этой цели в полюсах устраивают цилиндрические выдвижные железные сердечники.

### 204. Регулирование скорости вращения последовательных двигателей постоянного тока, работающих от сети неизменного напряжения

Возможны два способа регулирования скорости вращения: 1) изменением падения напряжения в цепи главного тока и 2) изменением потока возбуждения.

а) При первом способе возможно лишь понижение скорости вращения. Регулирование осуществляется введением в цепь якоря регулируемого сопротивления, рассчитанного на длительное прохождение номинального тока. Этот способ ничем не отличается от такого же рассмотренного выше (§ 201, п. «б») способа регулирования скорости параллельных двигателей. Способ по тем же соображениям неэкономичен, но так как по условиям работы последовательных двигателей в главных областях их применения — тяговые и подъемно-транспортные установки (краны) — реостат приходится включать лишь на непродолжительное время, то этот способ используется очень широко.

В этом способе тот же реостат используется и для пуска в ход последовательного двигателя.

Если двигателей два (как на двигательных вагонах трамвая и эл. железных дорог), то одновременно применяется и переключение двигателей с последовательного соединения на параллельное. При последовательном соединении двигателей и при выключенном регулирующем реостате напряжение, приходящееся на каждый двигатель, понижается вдвое, а поэтому достижимая скорость при номинальной нагрузке равна половине той, которую двигатель развивает при параллельном включении обоих двигателей. Пуск в ход и регулирование скорости и переключение с последовательного соединения на параллельное осуществляется посредством специального контроллера или контактора (выполняющего те же переключения, но имеющего другое устройство)

б) Регулирование скорости в сторону ее повышения от скорости, достижимой при данной нагрузке и выведенном полностью реостате, возможно путем ослабления потока  $\Phi_b$ . Это можно осуществить двояко: либо путем реостата, приключенного параллельно к обмотке возбуждения («шунтированием полюсов»), либо секционированием обмотки возбуждения.

Рассмотрим шунтирование обмотки возбуждения реостатом. Предположим сначала, что двигатель работает по нормальной схеме при выключенном реостате в цепи якорного тока и развивает момент вращения  $M_b = C_m \Phi_b I_{ab}$  при скорости вращения

$$n_b = C_n \frac{U - I_{ab} R_\Sigma}{\Phi_b}.$$

Пренебрежем за малостью падением напряжения  $I_{ab} R_\Sigma$  и предположим, что двигатель не насыщен, следовательно,  $\Phi_b = \Phi_s = c I_{ab}$ ; тогда можем написать:

$$M_b = C_m' I_s I_{ab} = C_m' I_{ab}^2 \text{ и } n_b = C_n' \frac{U}{I_{ab}}.$$

При шунтировании обмотки возбуждения сопротивлением, при котором ток в обмотке возбуждения равен половине тока якоря, получим, что  $I_s' = I_{ab}'/2$  и

$$M_b' = C_m' I_s' I_{ab}' = C_m' \frac{I_{ab}'}{2} I_{ab}' = C_m' \frac{I_{ab}'^2}{2}.$$

Так как при неизменном моменте сопротивления вращающий момент должен иметь то же значение  $M_b' = M_b$ , то для этого должно выполняться равенство:

$$C_m' \frac{I_{ab}'^2}{2} = C_m' I_{ab}^2,$$

иначе

$$I_{ab}' = \sqrt{2} I_{ab} \text{ и } I_s' = \frac{I_{ab}'}{2} = \frac{I_{ab}}{\sqrt{2}}.$$

Таким образом, скорость вращения двигателя при принятом шунтировании обмотки возбуждения будет:

$$n_b' = C_n' \frac{U}{I_s'} = C_n' \frac{U}{I_{ab}/\sqrt{2}} = \sqrt{2} n_b,$$

т. е. в  $\sqrt{2}$  раза больше, чем до шунтирования.



При учете падения напряжения, которое при двойном токе будет в 2 раза больше, числитель в выражении для  $n_b$  —

$$n_b = C_n \frac{U - I_{ab} R_\Sigma}{\Phi_b}$$

несколько уменьшится, но это уменьшение будет незначительно вследствие малости падения напряжения по сравнению с  $U$ . Таким образом, при этом способе скорость вращения возрастает пропорционально уменьшению тока  $I$ , в обмотке возбуждения.

Способ экономичен, так как напряжение на обмотке возбуждения невелико и сопротивление шунта должно быть малым. Способ широко используется в электрической тяге.

Отметим, что увеличение скорости вращения не должно быть больше предельного допустимого по условиям механической прочности двигателя. Как правило, наибольшая допустимая скорость вращения последовательного двигателя не должна превышать номинальную скорость вращения двигателя более чем на 50%.

Недостатком этого способа является неодинаковая быстрота изменения тока в обмотке возбуждения и в шунтирующем ее реостате; из-за индуктивности обмотки возбуждения изменение тока в ней отстает во времени от изменения тока в шунте.

Для того чтобы при быстрых изменениях тока двигателя ток изменялся в реостате так же, как в обмотке возбуждения, приходится делать реостат индуктивным, наматывая реостатную проволоку на замкнутый железный сердечник.

в) Возрастания скорости вращения последовательного двигателя можно достигнуть, как упоминалось выше, также путем с е к ц и о н и р о в а н и я обмотки возбуждения. Для этого обмотка каждого из главных полюсов разбивается на секции, чаще всего на две либо три, которые соединяются в разной комбинации (либо все последовательно, либо две параллельно и затем последовательно с третьей, либо все три параллельно).

Возьмем случай разделения обмотки каждого полюса на две секции. Соединяя секции параллельно, мы получаем в каждой секции половинное число витков и половинный ток; каждая секция создает таким образом  $\frac{1}{4}$  числа первоначальных ампервитков обмотки возбуждения, а так как обе секции включены параллельно, то в сумме получаем  $\frac{1}{2}$  первоначальных ампервитков обмотки возбуждения, а следовательно, уменьшаем магнитный поток обмотки возбуждения в 2 раза и увеличиваем скорость вращения в том же отношении (в первом приближении).

С этой точки зрения способ равноценен шунтированию полюсов, но из-за сложности устройства переключения секций этот способ не получил широкого применения, — предпочтение отдают шунтированию полюсов. Преимуществом является одинаковая скорость изменения тока в обеих секциях вследствие их одинаковой индуктивности.

г) Иногда применяют изменение скорости последовательного двигателя путем шунтирования обмотки якоря. Из рассмотрения выражения для вращающего момента  $M_b = C_m \Phi_b I_{ab}$  видим, что при шунтировании якоря и при том же моменте вращения ток в обмотке возбуждения должен возрасть, а следовательно, скорость вращений

$$n_b = C_n \frac{U - I_{ab} R_\Sigma}{\Phi_b}$$

должна уменьшаться.

Так как на зажимах якоря имеем напряжение сети  $U$  (за вычетом небольшого падения в последовательной обмотке возбуждения), то способ неэкономичен. Он применяется редко и лишь в установках с последовательными двигателями, когда требуется кратковременное большое снижение скорости вращения. Уменьшения скорости при этом способе можно достигнуть в 5 и даже в 10 раз.

#### 205. Способы регулирования скорости вращения двигателей смешанного возбуждения

В зависимости от того, является двигатель смешанного возбуждения параллельным двигателем со вспомогательной последовательной обмоткой возбуждения или последовательным двигателем со вспомогательной параллельной обмоткой возбуждения, применяются соответственно либо способы регулирования скорости вращения параллельных двигателей, либо способы регулирования скорости вращения последовательных двигателей.

---

---

---

## ГЛАВА IX

### СОВМЕСТНАЯ РАБОТА МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

#### А. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

##### 206. Общее замечание

Если мощность генератора постоянного тока меньше мощности, потребляемой в сети, на которую он работает, то параллельно к работающему генератору приключают другой генератор соответствующей мощности. На практике применяют преимущественно параллельные генераторы, иногда согласо-смешанные генераторы постоянного тока. Мы рассмотрим параллельную работу тех и других порознь.

Ранее, в период преобладающего распространения установок постоянного тока, строили передачи энергии по системе Тюри, которые выполнялись из ряда последовательно включенных последовательных генераторов постоянного тока на отправном конце передачи и ряда последовательно соединенных последовательных двигателей постоянного тока на приемном конце передачи. Возможность такой передачи покоилась на специфических свойствах такого соединения последовательных машин постоянного тока. Хотя ныне таких передач не строят и ранее осуществленные были впоследствии заменены передачами трехфазного тока, тем не менее упомянутые свойства последовательных машин представляют известный интерес, а потому вкратце остановимся и на них.

##### 207. Параллельная работа параллельных генераторов постоянного тока

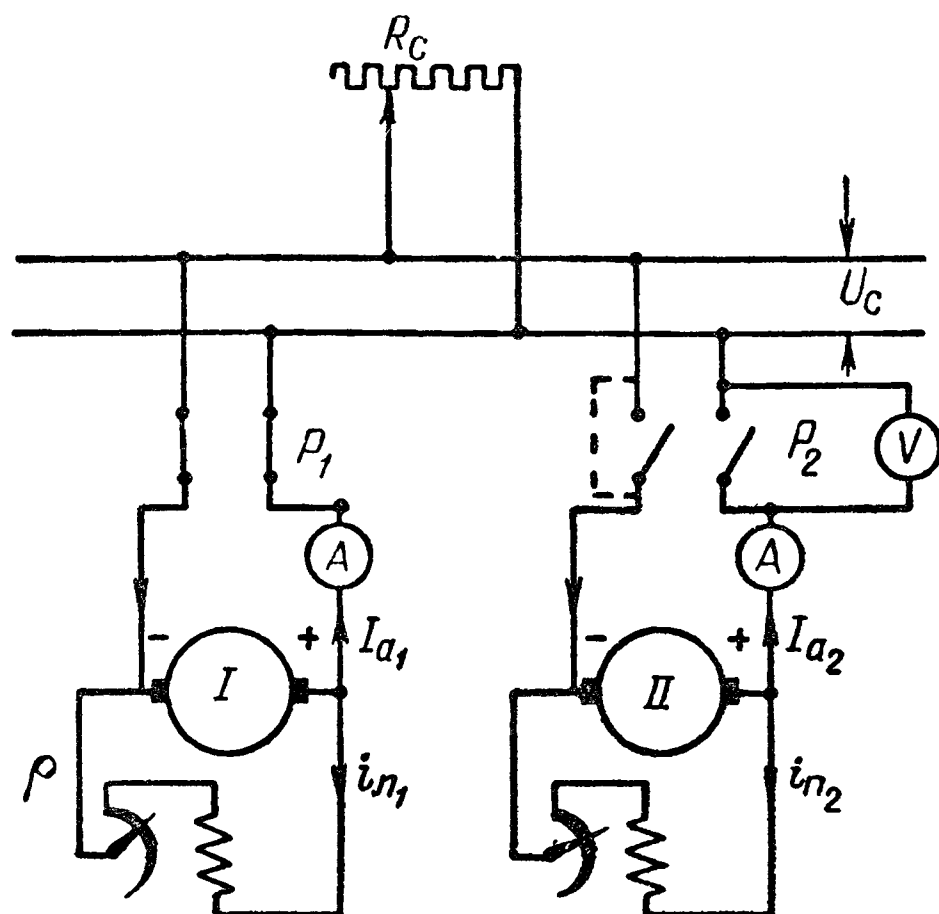
а) Способ включения на параллельную работу. Поступают следующим образом. Собрав схему, как показано на фиг. 296, приводят генератор  $II$ , подлежащий включению на параллельную работу с работающим генератором  $I$ , во вращение и устанавливают по тахометру номинальную скорость вращения. Затем возбуждают его, воздействуя на его регулировочный реостат  $\rho$ , и устанавливают напряжение, равное напряжению на первом генераторе. Далее, прежде чем включать рубильник  $P_2$  на сеть, необходимо проверить правильность полярностей зажимов, т. е. нужно убедиться в том, что если правый верхний зажим  $P_2$  положительный, то и правый нижний зажим тоже положительный. Такую проверку легко осуществить, если имеется магнитоэлектрический вольтметр на напряжение сети, который при правильном присоединении его к зажимам дает отклонение в правильную сторону. В этом случае, снабдив вольтметр щупами, прикладываем их сначала к верхним, затем к нижним зажимам рубильника. Если в обоих случаях отклонения получаются в одну и ту же сторону, то схема была составлена правильно, в противном случае концы от генератора  $II$  к рубильнику  $P_2$  нужно поменять местами.

На практике обычно пользуются обычными щитовыми приборами электромагнитной системы, которые не реагируют на изменение полярности зажимов, т. е. дают всегда отклонение в одну и ту же сторону. В этом случае поступают следующим образом. Левые верхний и нижний зажимы рубильника  $P_2$  соединяют проводником, а если рубильник  $P_2$  состоит из двух однополюсных рубильников, то один из них замыкают. Тогда, присоединив концы вольтметра к верхнему и нижнему правым зажимам, мы получим на вольтметре либо нуль, если схема соединений составлена правильно и напряжения генераторов точно подогнаны, либо двойное номинальное напряжение при неправильной схеме. Очевидно, что при этом вольтметр должен быть на двойное напряжение. Если такого под руками нет, то поступают следующим образом. Сообщают генератору  $II$  номинальную скорость вращения; не возбуждая его, соединяют проволокой, скажем, левые зажимы рубильника; тогда между правыми зажимами рубильника вольтметр покажет номинальное напряжение, которое имеется в сети. Если затем слегка возбудить генератор  $II$ , то при правильной полярности зажимов показание вольтметра уменьшится, в противном случае — увеличится. Вместо вольтметра можно пользоваться лампочкой накаливания на номинальное напряжение сети либо двумя такими лампочками последовательно включенными — в зависимости от способа выполнения проверки полярности зажимов.

б) Перевод нагрузки на параллельно приключенный параллельный генератор. После установления правильности полярностей зажимов приключаемого (второго) генератора и работающего (первого) генератора и проверки равенства их напряжений можно рубильник  $P_2$  замкнуть; при этом ток в цепи якоря второго генератора будет равен нулю. Для того чтобы перевести нагрузку с первого генератора на второй, можно поступить одним из следующих способов; при этом будем предполагать, что оба генератора совершенно одинаковы.

Можно начать уменьшать ток возбуждения  $i_{n1}$  первого генератора. Вследствие этого начнет уменьшаться его э. д. с., а следовательно, и напряжение на его зажимах. Так как это напряжение станет меньше напряжения второго генератора, то последнее должно тоже уменьшиться, что произойдет за счет тока нагрузки, которую второй генератор возьмет на себя, вследствие чего в этом генераторе возникнет соответствующее падение напряжения. Предполагая, что сопротивление сети  $R_c$  неизменно, мы получим из-за уменьшения напряжения сети некоторое снижение тока нагрузки  $I_c$ ; однако это уменьшение будет по сравнению с возрастанием тока  $I_{a2}$  небольшим. Очевидно, что ток в цепи якоря первого генератора  $I_{a1}$  уменьшится настолько, чтобы ток нагрузки  $I_c$  равнялся сумме токов обоих генераторов:  $I_c = I_{a2} + I_{a1}$ . Продолжая дальнейшее уменьшение тока возбуждения  $i_{n1}$  первого генератора, дойдем до значения тока в его цепи якоря  $I_{a1} = 0$ ; тогда весь ток нагрузки  $I_c$  станет равным  $I_{a2}$ ; при этом значение тока  $I_c = I_{a2}$  будет меньше первоначального, когда было  $I_{a1} = 0$ , на столько, на сколько уменьшится общее напряжение сети  $U_c$  против первоначального значения.

Можно поступить иначе, а именно, после приключения вхолостую генератора на параллельную работу с первым генератором, начать увеличивать

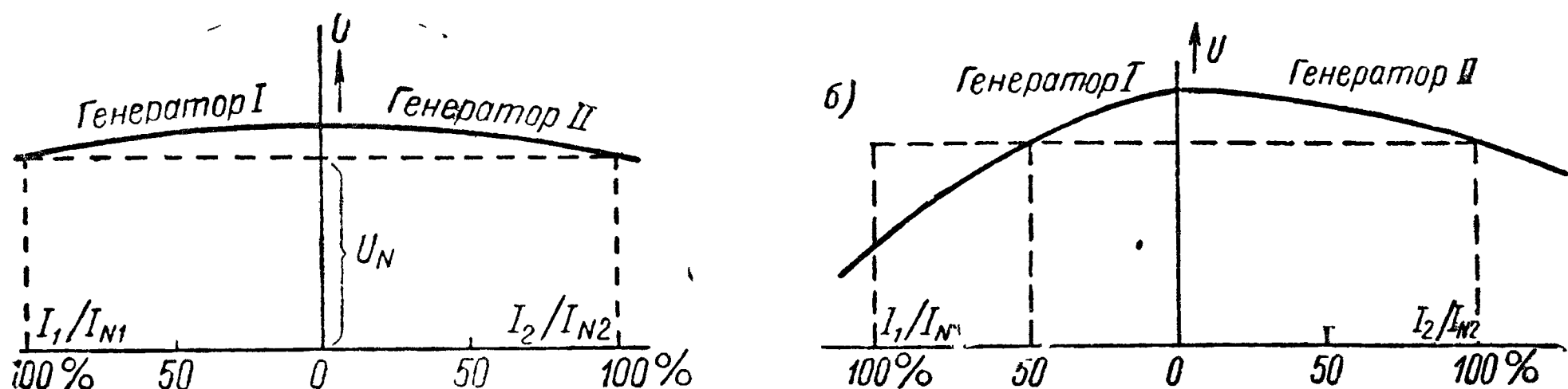


Фиг. 296. Схема включения на параллельную работу двух параллельных генераторов постоянного тока.

ток возбуждения  $i_{n2}$  второго генератора. Проведя такие же рассуждения, убедимся, что при этом способе перевода нагрузки напряжение  $U_c$  сети несколько возрастет, а следовательно, на столько же увеличится и ток нагрузки  $I_c$ .

Из сопоставления этих двух способов перевода нагрузки на приключенный генератор следует, что для сохранения напряжения сети  $U_c$  неизменным (что требуется по условиям эксплуатации) нужно одновременно уменьшать ток возбуждения в работавшем генераторе и увеличивать ток возбуждения в приключенном в параллель генераторе таким образом, чтобы  $U_c$  оставалось неизменным. Очевидно, что правило сохраняет силу и тогда, когда оба генератора неодинаковы по мощностям.

в) Распределение нагрузки между параллельно включенными параллельными генераторами. Предположим сначала, что скорости вращения обоих генераторов поддерживаются неизменными и что оба генератора включены



Фиг. 297. Распределение нагрузки между двумя параллельно включенными параллельными генераторами постоянного тока.

параллельно вхолостую,  $I_c = 0$ , причем их номинальные мощности не равны,  $P_{N1} \neq P_{N2}$ . Для того чтобы нагрузка сети распределялась между генераторами пропорционально их номинальным мощностям, необходимо, чтобы падения напряжения в генераторах при их номинальных токах якоря были одинаковы. В этом случае внешние рабочие характеристики обоих генераторов получают вид, показанный на фиг. 297, а. Если бы при нагрузке одного генератора на 50% падение напряжения в нем было равно падению напряжения во втором при нагрузке его на 100% (фиг. 297, б), то при дальнейшем возрастании нагрузки сети второй генератор перегружался бы, что недопустимо, в то время как первый был бы недогруженным.

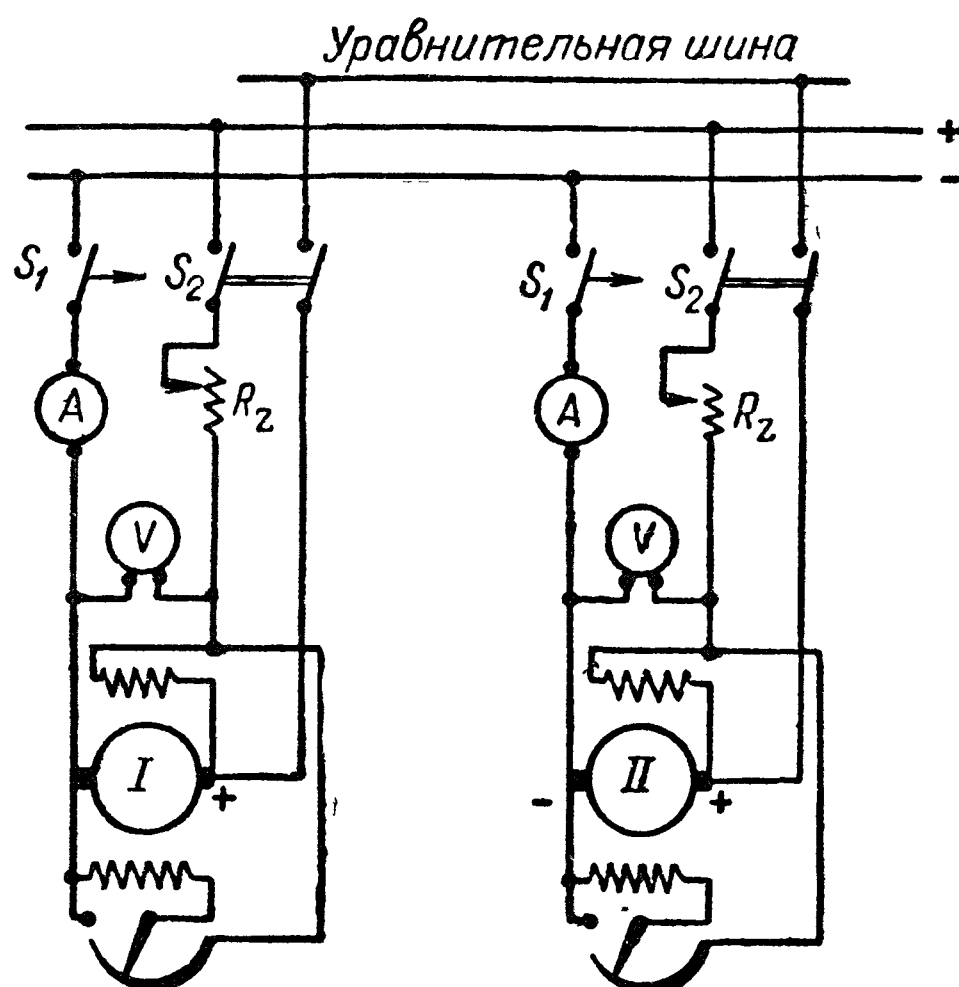
Практически, чтобы судить о возможности параллельной работы двух параллельных генераторов, нужно сравнивать их внешние (рабочие) характеристики с учетом происходящего с возрастанием нагрузки уменьшения скорости вращения двигателя, вращающего генератор.

г) Переход одного из параллельно включенных параллельных генераторов в двигательный режим. Если в одном из двух параллельно включенных вхолостую параллельных генераторов уменьшить ток возбуждения настолько, что э. д. с. в нем делается меньше, чем напряжение на зажимах, то в цепи его якоря пойдет ток, направленный навстречу э. д. с. Генератор перейдет в двигательный режим при сохранении прежнего направления вращения, так как при этом направление тока в обмотке возбуждения генератора останется прежним [условие, необходимое, как мы видели (гл. VIII, § 186), для сохранения прежнего направления вращения]. Если генератор приводится во вращение первичным двигателем, то для последнего такая работа недопустима; поэтому для того, чтобы гарантировать, что такое явление не будет иметь места, обычно при приключении в параллель генератора постоянного тока делают его э. д. с. на 1—1,5% больше напряжения сети, в этом случае он сразу нагрузится генератором.



## 208. Параллельная работа согласно-смешанных генераторов постоянного тока

а) **Необходимость в уравнивательной шине.** Параллельная работа согласно-смешанных генераторов постоянного тока возможна только при снабжении их уравнивательной шиной со стороны последовательных обмоток. Схема соединений для двух согласно-смешанных генераторов приведена на фиг. 298. При отсутствии уравнивательной шины в случае, если по какой-либо причине индуцируемая в одном из генераторов э. д. с.  $E_b$  возрастет (например, вследствие возрастания скорости вращения или тока возбуждения), то вследствие этого возрастет и ток якоря, отдаваемый генератором, а одновременно с этим возрастет и магнитный поток генератора вследствие увеличения намагничивающих ампервитков последовательной обмотки возбуждения. Это вызовет дальнейшее возрастание э. д. с.  $E_b$  и еще большую нагрузку генератора. Другой генератор начнет разгружаться. В результате параллельная работа согласно-смешанных генераторов окажется неустойчивой; кроме того, генератор, сбросивший свою нагрузку, может перейти в двигательный режим работы, причем, вследствие изменения направления тока в его последовательной возбуждающей обмотке, она начнет действовать размагничивающим образом, уменьшая магнитный поток этой машины. Скорость вращения генератора, перешедшего в двигательный режим, может приобрести при этих условиях недопустимое значение. При наличии уравнивательной шины, присоединенной к зажимам, которые соединены с последовательной возбуждающей обмоткой, указанные выше явления устраняются. В самом деле, при увеличении нагрузки одного из генераторов одновременно увеличится возбуждение и другого генератора благодаря уравнивательной шине.



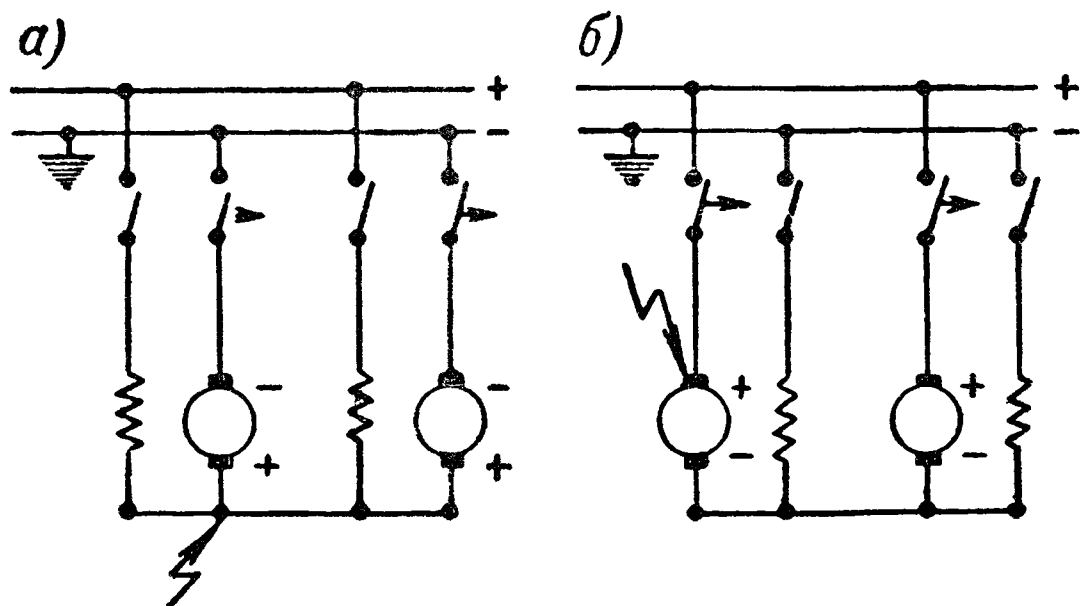
Фиг. 298. Включение на параллельную работу двух смешанных генераторов постоянного тока.

Для того чтобы нагрузка между параллельно соединенными генераторами распределялась пропорционально их номинальным мощностям, необходимо: 1) чтобы процентные изменения напряжений генераторов были равны и 2) чтобы сопротивления последовательных обмоток возбуждения (включая и сопротивления соответствующих соединительных проводов до шин) были обратно пропорциональны номинальным токам генераторов. Подбор сопротивлений производится опытным путем на месте установки генераторов посредством включения в цепь последовательных возбуждающих обмоток специальных небольших регулируемых сопротивлений  $R_z$  (фиг. 298).

Необходимо отметить, что для повышения устойчивости параллельной работы генераторов сопротивление уравнивательных проводов нужно выбирать возможно малым.

б) **Способы включения для параллельной работы согласно-смешанных генераторов постоянного тока.** Пользуясь схемой фиг. 298, можно осуществить параллельное приключение нового генератора к ранее работавшему по одному из следующих двух способов, получивших наименования по областям их применения.

1) Т р а м в а й н ы й с п о с о б. Сначала включают двухполюсный рубильник  $S_2$  (фиг. 298), вследствие чего в последовательную обмотку возбуждения генератора, подлежащего включению на параллельную работу, начнет поступать ток от работающего генератора, и генератор несколько возбудится, однако нагрузки он не может принять, так как его якорная цепь разомкнута. Подрегулировав затем ток в параллельной возбуждающей обмотке так, чтобы напряжение генератора было равно напряжению на шинах работающего генератора, включают однополюсный рубильник  $S_2$ ; при дальнейшем увеличении тока параллельной возбуждающей обмотки приключенный генератор начнет брать на себя нагрузку, работавший же генератор будет разгружаться. Недостатком этого способа является то, что при включении рубильника  $S_2$  ток в последовательной возбуждающей обмотке работающего генератора уменьшится вследствие того, что часть его по уравнильному проводу ответвится в последовательную возбуждающую обмотку генератора, подлежащего включению. В результате этого напряжение работающего генератора понизится.



Фиг. 299. Включение смешанного генератора постоянного тока при эл. тяге: а — правильное, б — неправильное.

Способ, как показывает его название, применялся в трамвайных установках постоянного тока. Ныне, как правило, в новых трамвайных установках постоянного тока питание происходит ртутными выпрямителями от сети трехфазного тока; питание от согласно-смешанных генераторов постоянного тока сохранилось только в старых установках.

2) О с в е т и т е л ь н ы й с п о с о б. Возбуждают приключаемый генератор, воздействуя на реостат в параллельной возбуждающей обмотке, до напряжения работающего генератора и включают сначала однополюсный рубильник  $S_1$ , а затем двухполюсный  $S_2$  или, что равносильно, одновременно включают рубильники  $S_1$  и  $S_2$ , если они объединены в один трехполюсный рубильник. После включения рубильника  $S_2$  в последовательную обмотку вновь приключенного генератора ответвляется часть тока работавшего генератора через уравнильный провод; это повысит его возбуждение, и он сразу примет на себя часть нагрузки. При этом способе напряжение на шинах изменится мало, но внезапная нагрузка приключенного генератора и разгрузка работавшего генератора может при некоторых обстоятельствах вызвать кратковременное колебание нагрузки между генераторами и соответственно колебание их скоростей вращения. Этот способ применялся в осветительных установках постоянного тока из-за малого изменения напряжения.

в) О выполнении схемы электрических соединений. При осуществлении схемы эл. соединений амперметр и максимальный выключатель  $S_1$  нужно включать так, как показано на схеме фиг. 298, т. е. в тот провод, который идет непосредственно от зажима якоря, так как при включении их в провод, проходящий через последовательную возбуждающую обмотку, на их показание и действие будут влиять уравнильные токи.

В трамвайных согласно-смешанных генераторах, в которых один провод должен быть соединен с рельсом, последовательную возбуждающую обмотку нужно включать между якорем и контактным проводом, а максимальный выключатель — между рельсом и якорем (фиг. 299, а); при другом включении (фиг. 299, б) в случае работы одного генератора и замыкания его на землю максимальный выключатель может не подействовать.

## Б. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 209. Свойство схемы

На фиг 300 кривая  $E_b' = f(I_a)$  представляет внутреннюю характеристику (нагрузки) последовательного генератора постоянного тока для некоторой скорости вращения  $n_1 = \text{const}$ . Кривая  $E_b'' = f(I_a)$  дает внутреннюю характеристику последовательной машины при работе ее двигателем при скорости вращения  $n_2 = \text{const}$ .

Если для любого значения тока якоря  $I_a$  выполняется равенство

$$E_b' - I_a R_\Sigma = E_b'',$$

где  $R_\Sigma$  — сумма всех сопротивлений в общей цепи первой (1) и второй (2) машин,

$$R_\Sigma = \left( R_a + \frac{2\Delta U_B}{I_a} + R_s \right)_1 + \left( R_a + \frac{2\Delta U_B}{I_a} + R_s \right)_2 + R_e,$$

а  $R_e$  — сопротивление проводов, соединяющих зажимы обеих машин, то, очевидно, скорость последовательного двигателя будет оставаться неизменной:  $n_2 = \text{const}$ .

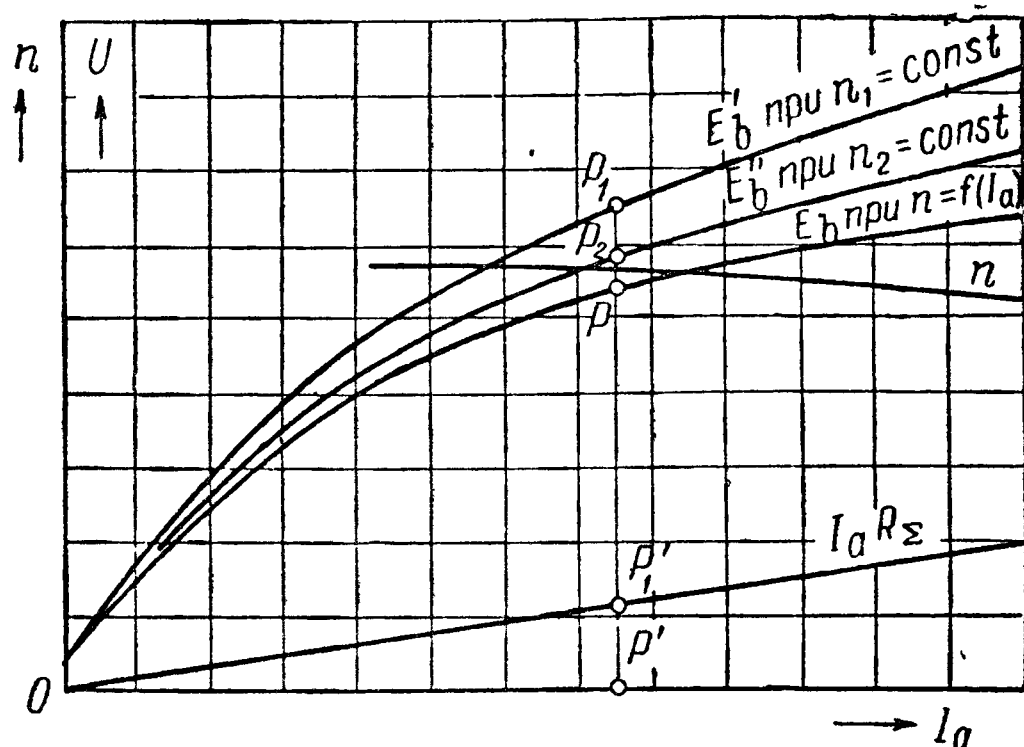
Такое идеальное совпадение внутренних характеристик обеих машин практически неосуществимо. В действительности при некотором значении тока в цепи якорей обеих машин  $\overline{OP}' = I_a'$ , получим, что разность

$$E_b' - I_a' R_\Sigma \geq E_b''.$$

Возьмем случай, когда  $E_b' - I_a R_\Sigma < E_b''$  и равна  $E_b$ . Очевидно, что в этом случае и действительная скорость вращения будет меньше и определится из пропорции:  $n : n_2 = E_b : E_b''$ , откуда  $n = n_2 \frac{E_b}{E_b''}$ .

Практически изменение скорости вращения последовательного двигателя получается незначительным; для соотношений, взятых на фиг. 300, оно представлено кривой  $n = f(I_a)$ .

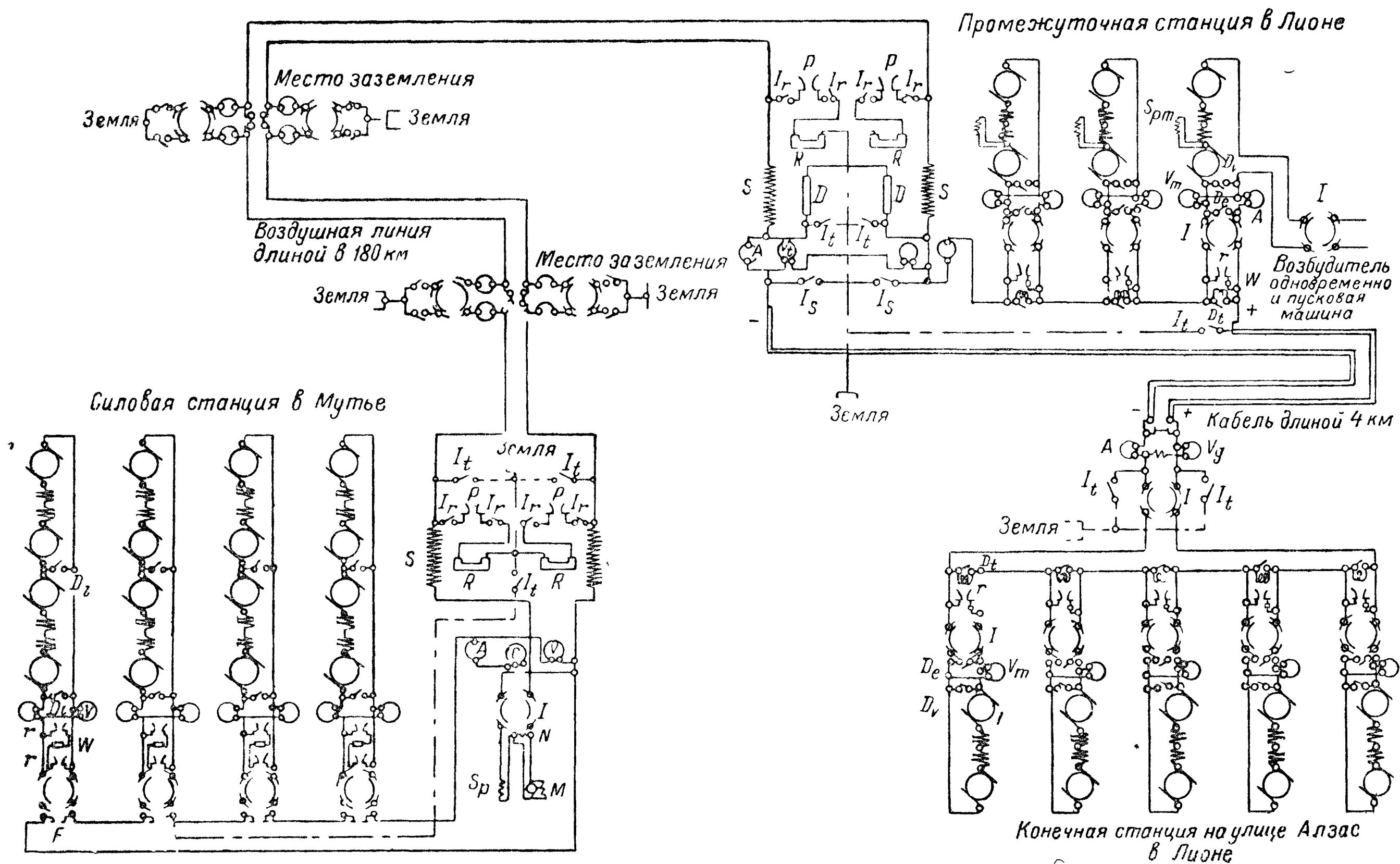
Если требуется, чтобы скорость двигателя оставалась постоянной и равной  $n_2$ , то этого можно достигнуть, приключив параллельно его обмотке возбуждения некоторое регулируемое сопротивление.



Фиг. 300. Включение последовательного генератора и последовательного двигателя постоянного тока. Свойство схемы.

### 210. О передаче эл. энергии по системе Тюри

Указанное свойство последовательного двигателя постоянного тока сохранять при питании от последовательного генератора постоянного тока почти постоянную скорость вращения при всех нагрузках было использовано Броуном для передачи эл. энергии постоянным током на дальнее расстояние. Так как при этом с нагрузкой меняется и ток и напряжение, то такая передача энергии возможна только от одного генератора к одному двигателю, а потому такой способ передачи энергии не мог найти широкого применения. Другой швейцарский инженер Тюри предложил видоизменить передачу таким



Фиг. 301 Схема Тюри, примененная в установке Мутье—Лион

образом, чтобы при всех нагрузках поддерживать постоянное значение тока; при этом можно включить на отправном конце передачи несколько последовательно соединенных последовательных генераторов, а на приемном конце — несколько последовательно соединенных последовательных двигателей.

Осуществленная по этой системе в 1906 г. во Франции установка передавала эл. энергию от гидравлической станции в Мутье в город Лион на расстояние 180 км. Она просуществовала до 1937 г., когда была заменена передачей трехфазного тока. Передача была на постоянное значение тока 75 а, напряжение при полной нагрузке равнялось 56 800 в. На гидростанции в Мутье были установлены 4 агрегата с водяными турбинами по 1065 квт при наибольшей скорости вращения 300 об/мин. Каждый агрегат имел по два сдвоенных, а всего по 4 последовательно соединенных последовательных генератора постоянного тока по 226 квт; наибольшее напряжение одного генератора равнялось 3550 в (фиг. 301). Регулировка напряжения осуществлялась регулированием скорости вращения агрегата, т. е. водяной турбины. Наибольшее напряжение на отправном конце передачи равнялось  $3550 \cdot 4 \cdot 4 = 56\,800$  в. Приемных станций в Лионе было две, на одной из них было установлено 3, а на другой 5 сдвоенных двигателей по  $265 \cdot 2 = 530$  квт при скорости вращения 428 об/мин, которая поддерживалась сдвигом щеток с геометрической магнитной нейтрали.

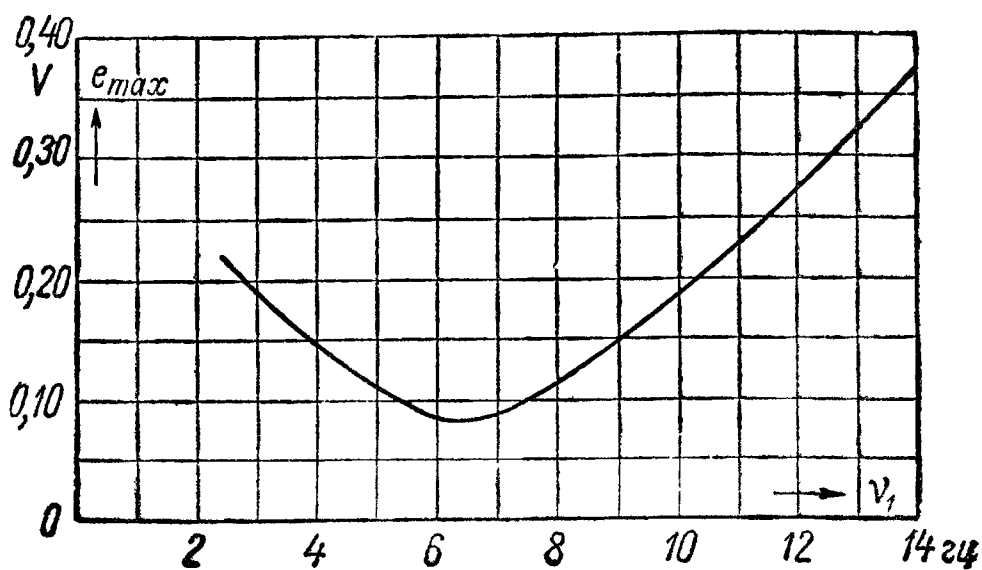
## В. ЯВЛЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ ПРИ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЕ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 211. Виды колебаний

Наблюдаемые иногда при работе машин постоянного тока колебания могут быть вызваны причинами двоякого рода: 1) вынужденные колебания: они вызываются наличием внешней вынуждающей периодической силы; в случае генераторов — вследствие неравномерности вращающего момента первичного двигателя (поршневые первичные двигатели), в случае двигателей — вследствие неравномерности момента сопротивления (поршневой насос, поршневой компрессор), 2) собственные колебания вследствие неустойчивости характеристик машины.

### 212. Вынужденные колебания генераторов

Если первичный двигатель имеет пульсирующий момент вращения, то такие же пульсации будут и в напряжении приводимого им генератора постоянного тока. Для того чтобы эти пульсации не вызывали ощутимого мигания света питаемых генератором ламп накаливания, должны быть выполнены определенные условия. Опыты Г. А. Люста, произведенные им в 1911 г., показали, что чувствительность глаза к колебаниям света, испускаемого лампами накаливания, зависит не только от амплитуды колебаний, но и от их частоты. Наиболее чувствителен глаз к частоте колебаний около 6,5 гц; при увеличении частоты, так же как и при ее уменьшении, чувствительность глаза падает. На фиг. 302 приведена кривая допустимых колебаний напряжения при разных частотах, полученная Г. А. Люстом для пятисвечной угольной лампы на 110 в, показавшей наибольшую чувствительность к миганиям света из всех бывших тогда в продаже ламп накаливания. На основании ана-



Фиг. 302. Допустимые колебания напряжения при разных частотах для пятисвечной угольной лампы на 110 в по опытам Г. А. Люста.



логичной кривой, полученной К. Симонсом в 1917 г. для 32-свечной лампы на 220 в с металлической нитью (соответствует по току 16-свечной лампе на 110 в), Лякур составил тогда табл. 20 (введя надлежащий запас) значений  $1/\delta$ , обратных требуемой степени неравномерности:

$$\delta = \frac{\Omega_{\max} - \Omega_{\min}}{\Omega_{\text{med}}},$$

при которой можно получить спокойный свет без аккумуляторной батареи.

Таблица 20

	Число цилиндров	Угловое смещение кривошипов	Число периодов основного колебания на один оборот	Число оборотов в минуту				
				300	200	150	100	75
				$1/\delta = \Omega_{\text{med}}/(\Omega_{\max} - \Omega_{\min})$				

Паровые машины

а) Одноцилиндровые . . . . .	1	—	2}	238	292	221	137	120
б) Тандем . . . . .	2	0°	2}					
в) Компаунд . . . . .	2	90°	4	83	171	238	293	221
г) Тройного расширения . . . . .	3	120°	6 .	32	83	143	238	294

Двигатели внутреннего сгорания

а) Четырехтактные

1) Простого действия	{	1	—	0,5}	120	120	120	120	120
		2	180°	0,5}					
		2	360°	1,0	221	137	120	120	120
		3	120°	1,5	294	221	158	120	120
		4	180°	2,0	238	292	221	137	120
2) Двойного действия	{	1	—	0,5}	120	120	120	120	120
		2	180°	0,5}					
		2	360°	2,0	238	292	221	137	120
		3	120°	1,5	294	221	158	120	120
		4	90°	4,0	83	171	238	293	221
		4	180°	2,0	238	292	221	137	120

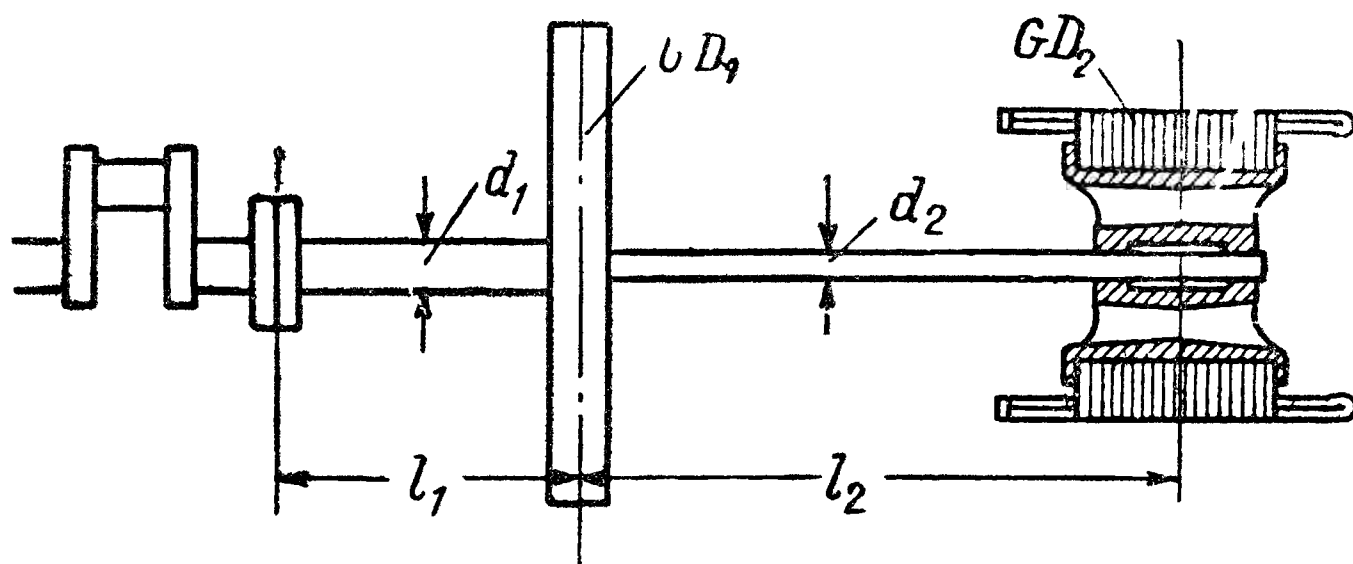
б) Двухтактные

1) Простого действия	{	1	—	1,0}	221	137	120	120	120
		2	0°	1,0}					
		2	180°	2,0	238	292	221	137	120
		3	120°	3,0	143	238	294	221	158
		4	90°	4,0	83	171	238	293	221
		4	180°	2,0	238	292	221	137	120
2) Двойного действия	{	1	—	2,0	238	292	221	137	120
		2	90°	4,0	83	171	238	293	221
		2	180°	2,0	238	292	221	137	120
		3	120°	6,0	32	83	143	238	294
		4	45°	8,0	18	39	83	171	238
		4	90°	4,0	83	171	238	293	221

Опыты с другими сортами ламп, произведенные Британской Ассоциацией для развития наук, подтвердив в общем характер кривых, полученных Люстом и Симонсом, дали отличающиеся в количественном отношении результаты. Однако, так как при обычных условиях глаз менее чувствителен к миганию ламп, чем в специально созданной лабораторной обстановке при напряженном внимании наблюдателя, то табл. 20 дает вполне приемлемые результаты.

### 213. Влияние крутильных колебаний вала (машины)

Если генератор сочленен с первичным поршневым двигателем посредством эластичного вала, то необходимо, чтобы частота собственных крутильных колебаний вала отличалась возможно больше от частоты вынужденных колебаний генератора, в противном случае напряжение генератора будет испыты-



Фиг 303. Вал с двумя частотами свободных колебаний.

вать сильные колебания, которые вызовут мерцание света ламп, а при соотношениях, близких к резонансу частот обоих колебаний, может произойти, кроме того, поломка вала.

Частота собственных крутильных колебаний вала, при пренебрежении умеряющим действием трения, вычисляется по формуле:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k \cdot 9,81 \cdot 4}{GD^2}}, \text{ где } k = \frac{\pi d^4 \cdot 0,385 E}{32 \cdot 100l}. \quad (479)$$

Здесь  $d$  и  $l$  — диаметр и длина вала в см,  $E$  — модуль упругости в кг/см<sup>2</sup>;  $GD^2$  — маховой момент в кгм<sup>2</sup>. Приняв  $E = 2\,200\,000$  кг/см<sup>2</sup>, имеем:

$$f_0 = \frac{28,8 d^2}{\sqrt{l \cdot GD^2}} [\text{гц}].$$

Если вал имеет не всюду одинаковый диаметр, то в формулу для  $k$  (479) следует подставить  $d^4/l$ , вычисленное по диаметрам и длинам отдельных участков вала:

$$\frac{l}{d^4} = \frac{l_1}{d_1^4} + \frac{l_2}{d_2^4} + \frac{l_3}{d_3^4} + \dots$$

Если между жесткими частями валов генератора и первичного двигателя имеются несколько маховых масс, то появится несколько частот свободных колебаний. Для случая, представленного на фиг. 303, получается две частоты, определяемые из формулы:

$$f_0 = \sqrt{\frac{q^2 + r^2 + s^2}{2}} \pm \sqrt{\left(\frac{q^2 + r^2 + s^2}{2}\right)^2 - q^2 s^2} [\text{гц}],$$

где

$$q = \frac{28,8 d_1^2}{\sqrt{l_1 GD_1^2}}, \quad r = \frac{28,8 d_2^2}{\sqrt{l_2 GD_1^2}}, \quad s = \frac{28,8 d_2^2}{\sqrt{l_2 GD_2^2}},$$

причем  $q$  и  $r$  — частоты свободных колебаний маховика по отношению к отрезкам вала  $l_1$  и  $l_2$ , а  $s$  — частота свободных колебаний якоря по отношению к валу  $l_2$ .<sup>1</sup>

Кроме основной гармоники  $f_1$  вынуждающей силы, всегда имеются высшие гармоники, но, сделав  $f_0 < f_1$ , мы тем самым избежим резонанса и с ними.

Если добиться значения  $f_0 < f_1$  нельзя и приходится брать  $f_0 > f_1$ , то можно рекомендовать брать  $f_0 = (1,15 \div 1,20) f_1$ .

#### 214. Свободные колебания машин постоянного тока

Мы уже отмечали выше, при анализе работы параллельных двигателей и двигателей со встречно-смешанным возбуждением, свободные колебания машин постоянного тока в результате соответствующих характеристик. Здесь рассмотрим еще случай свободных колебаний в двигателях постоянного тока с добавочными полюсами при неправильном соотношении намагничений основных полюсов и добавочных полюсов. Этот случай представлял большие неприятности на первых порах применения добавочных полюсов.

Явление колебаний можно объяснить следующим образом. При сдвиге щеток с магнитной нейтрали против направления вращения двигателя, добавочные полюсы, действуя размагничивающим образом, уменьшают результирующий поток  $\Phi_b$ . Это влечет за собой уменьшение э. д. с.  $E_b = C_e \Phi_b n$ . Для восстановления равновесия должен возрасти ток  $I_a$ , и двигатель будет увеличивать свою скорость вращения  $n$  за счет увеличения электромагнитного момента. При возрастании тока  $I_a$  добавочные полюсы будут насыщаться и их влияние на  $\Phi_b$  будет уменьшаться; однако из-за наличия махового момента  $GD^2$  ротор двигателя будет еще продолжать ускоряться, а следовательно, и э. д. с.  $E_b$  будет расти. При соответствующем значении  $GD^2$  может случиться, что  $E_b$  станет больше  $U_N$ , тогда машина перейдет в генераторный режим и начнет тормозиться. Явление начнет протекать в обратном порядке до момента времени, когда ток в якоре вновь начнет возрастать. В рассматриваемом случае скорость двигателя будет, очевидно, совершать колебания вокруг некоторого среднего значения. Однако нужно иметь в виду, что при неблагоприятных соотношениях скорость двигателя и ток в якоре могут получить недопустимые значения. Так, если соотношение между магнитным полем параллельной обмотки и размагничивающим действием добавочных полюсов таково, что при некотором сдвиге щеток с магнитной нейтрали поток  $\Phi_b$  переменит свой знак, то тогда и  $E_b$  изменит знак, и якорь окажется в более тяжелых условиях, чем в том случае, если его при покоящемся состоянии подключить к сети без пускового реостата, так как теперь цепь его попадет под напряжение больше  $U_N$ . Опасение явлений качаний заставляет относиться с большой осторожностью к сдвигу щеток с нейтрали при наличии добавочных полюсов. Небольшой сдвиг все же иногда допускают в целях получения желаемых характеристик.

Только что сказанное дает также объяснение неустойчивого характера работы генератора со смешанным возбуждением при переходе его к двигательному режиму.

<sup>1</sup> С. П. Тимошенко, Теория колебаний в инженерном деле, 1932.

---

---

## ГЛАВА X

### ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ И КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

#### А. ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

##### 215. Вводные замечания

Происходящее в эл. машине преобразование энергии — либо механической в электрическую (электромашинный генератор), либо электрической в механическую (электродвигатель) — связано, как и всякое иное преобразование энергии, с некоторыми потерями ее.

Надлежащий учет потерь энергии имеет важное значение. Во-первых, все потери энергии переходят в конечном счете в тепловую энергию, вследствие чего происходит повышение температуры отдельных частей машины, а это повышение не должно переходить за определенные пределы, которые обуславливаются теплостойкостью изолирующих материалов, применяемых при изготовлении эл. машин. Во-вторых, потери энергии определяют собой коэффициент полезного действия машины (сокращенно к. п. д.).

При установившейся работе машины с неизменной нагрузкой повышение температуры отдельных частей машины зависит от энергии, теряемой в единицу времени (секунду), вследствие этого при определении к. п. д. машины приходится иметь дело с потерями энергии в единицу времени, т. е. с потерями мощности, и выражать потери энергии в единицах мощности, а именно в ваттах, либо киловаттах.

##### 216. Понятие о к. п. д. машины и способы его вычисления

Под коэффициентом полезного действия эл. машины, работающей с неизменной нагрузкой, понимают отношение отдаваемой, или полезной, мощности к подводимой, или затрачиваемой, мощности. Общепринятое обозначение к. п. д. через  $\eta$ :

$$\eta = \frac{\text{отдаваемая мощность}}{\text{подводимая мощность}} = \frac{\text{полезная мощность}}{\text{затрачиваемая мощность}} = \frac{\text{вторичная мощность}}{\text{первичная мощность}}. \quad (480)$$

В электромашинном генераторе всегда известна «полезная мощность», поэтому для вычисления к. п. д. генератора  $\eta_g$  нужно определить «затрачиваемую мощность», которая равна, очевидно, сумме «полезная мощность плюс все потери мощности».

$$\eta_g = \frac{\text{полезная мощность}}{\text{затрачиваемая мощность}} = \frac{\text{полезная мощность}}{\text{полезная мощность} + \text{все потери мощности}}. \quad (481)$$

В случае электродвигателя, наоборот, всегда известна «затрачиваемая мощность», поэтому для вычисления к. п. д. двигателя  $\eta_d$  нужно найти «полезную мощность», которая равна разности «затрачиваемая мощность минус все потери мощности»:

$$\eta_d = \frac{\text{полезная мощность}}{\text{затрачиваемая мощность}} = \frac{\text{затрачиваемая мощность} - \text{все потери мощности}}{\text{затрачиваемая мощность}}. \quad (482)$$

Таким образом, хотя понятие к. п. д. в случае генератора и в случае двигателя является одним и тем же (480), но вычисление его практически делается по разным формулам: (481) и (482).

Обозначая затрачиваемую (или первичную) мощность через  $P_1$ , полезную, или вторичную, мощность через  $P_2$ , а сумму всех потерь мощности через  $Q_\Sigma$ , имеем:

$$\eta_g = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + Q_\Sigma}, \quad (481a)$$

$$\eta_d = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - Q_\Sigma}{P_1}. \quad (482a)$$

Эти формулы можно представить так:

$$\eta_g = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + Q_\Sigma} = \frac{(P_2 + Q_\Sigma) - Q_\Sigma}{P_2 + Q_\Sigma} = 1 - \frac{Q_\Sigma}{P_2 + Q_\Sigma} \quad (481b)$$

$$\eta_d = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - Q_\Sigma}{P_1} = 1 - \frac{Q_\Sigma}{P_1}. \quad (482b)$$

Так как  $P_1 = P_2 + Q_\Sigma$ , то выражения (481b) и (482b) тождественны, и для получения  $\eta$  нужно в обоих случаях вычесть из единицы значение суммарных потерь, выраженное в долях затраченной мощности.

Если желательно иметь значение к. п. д., выраженное в процентах от затраченной мощности, то (481b) и (482b) нужно помножить на 100:

$$\eta_g\% = 100 - \frac{Q_\Sigma}{P_2 + Q_\Sigma} \cdot 100, \quad (481b)$$

$$\eta_d\% = 100 - \frac{Q_\Sigma}{P_1} \cdot 100. \quad (482b)$$

При тех больших значениях, которых достигает к. п. д. средних и крупных эл. машин, формулы (481b), (482b) и (481b), (482b) имеют преимущество перед формулами (481a) и (482a) при вычислениях на логарифмической линейке, так как они позволяют вычислять значения потерь в долях или в процентах от затрачиваемой мощности с большим числом верных значащих цифр, и соответственно значения  $\eta$  получаются с большим числом верных знаков за запятой

Суммарные потери мощности состоят из суммы отдельных потерь мощности.

$$Q_\Sigma = Q_1 + Q_2 + \dots,$$

а так как для получения  $\eta$  нужно знать

$$\frac{Q_\Sigma}{P_2 + Q_\Sigma} \cdot 100 = \frac{Q_\Sigma}{P_1} \cdot 100, \quad (483)$$

то и отдельные потери мощности должны быть вычислены в процентах от затрачиваемой мощности



При таком вычислении отдельных потерь мощности, т. е. в процентах от затрачиваемой мощности, получается не вполне верное представление об их относительной величине, ибо эта относительная величина зависит от величины суммарных потерь мощности. По этой причине часто, говоря о процентном значении отдельных потерь мощности в генераторах, выражают их в процентах от полезной мощности. Так, говоря, что потери мощности на возбуждение параллельного генератора постоянного тока составляют 1—5%, имеют в виду «от полезной мощности».

Очевидно, что, имея значения отдельных потерь мощности в генераторе, выраженные в долях от полезной мощности, взяв их сумму и вычтя ее из единицы, мы не получим правильного значения к. п. д., ибо в формуле для расчета к. п. д. суммарные потери мощности должны быть выражены в долях от затрачиваемой мощности. Это обстоятельство иногда упускают из виду, вследствие чего получаются досадные недоразумения.

Для того чтобы в случае генератора, имея значения потерь мощности, выраженные в долях от полезной мощности, получить верное значение к. п. д., нужно основную формулу (481а) преобразовать следующим образом:

$$\eta_g = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + Q_\Sigma} = \frac{1}{1 + \frac{Q_\Sigma}{P_2}}, \quad (481г)$$

что при переходе к процентам дает:

$$\eta_g = \frac{100}{100 + \frac{Q_\Sigma}{P_2} \cdot 100}. \quad (481д)$$

Здесь потери мощности вычисляются уже в процентах от полезной мощности. Этой формулой мы воспользуемся в дальнейшем.

Для двигателя формула, аналогичная (481д), не имеет смысла, так как в исходной формуле (482а) для к. п. д. двигателя мы можем найти полезную мощность лишь как разность между затраченной мощностью и всеми потерями мощности, а потому в этом случае выражение отдельных потерь мощности в долях или в процентах от затраченной мощности является естественным.

## 217. Подразделение потерь мощности в машине постоянного тока

Прежде всего нужно отметить.

1) потери мощности на трение, или механические потери ( $Q_m$ ), неизбежные в машине, как вращающемся механизме.

Все прочие потери, происходящие в эл. машине при установившемся режиме ее работы, можно подразделить на:

2) потери мощности в эл. цепях машины, связанные со значениями токов в каждой из них, — электрические потери мощности ( $Q_e$ ),

3) потери мощности в тех участках магнитных цепей машины (главной и добавочных полюсов), которые подвергаются перемагничиванию, — магнитные потери мощности ( $Q_\mu$ ).

Эл. цепи, как правило, делают из меди, а потому на практике электрические потери мощности часто называют потерями в меди и обозначают через  $Q_{Cu}$ , для упрощения индекса мы будем обозначать их через  $Q_e$ .

Магнитные цепи эл. машины состоят, за исключением зазоров, из ферромагнитных материалов, а поэтому на практике потери мощности в них назы-

вают обычно потерями в железе и обозначают через  $Q_{Fe}$ , для упрощения индекса мы будем обозначать их через  $Q_{\mu}$ .<sup>1</sup>

Таким образом, сумму всех потерь мощности в эл. машине при установившемся режиме ее работы можно представить так.

$$Q_{\Sigma} = Q_m + Q_e + Q_{\mu}. \quad (48)$$

Явления, сопутствующие процессу преобразования энергии в эл. машине и создающие потери мощности в ее электрических и магнитных цепях, очень сложны. Вследствие этого лишь часть потерь мощности может быть вычислена по строго обоснованным формулам. Для вычисления прочей части потерь мощности приходится прибегать к значительным упрощениям явлений, вызывающих эти потери, и, наконец, часть потерь мощности вовсе не поддается количественному учету, и их приходится оценивать по средним опытным данным.

Указанные обстоятельства являются причиной того, что в заводской практике наибольшее применение имеют простые формулы, отображающие сущность явлений и зависимость их от определенных физических величин, с поправочными коэффициентами, которые находят путем сличения расчетных значений потерь мощности и потерь мощности, наблюдаемых при испытании готовых эл. машин данной категории. В отношении магнитных потерь ( $Q_{\mu}$ ) такой метод учета тем более рационален, что значение их (как увидим дальше) в большой степени зависит от применяемых на заводе технологических процессов.

Электрические ( $Q_e$ ) и магнитные ( $Q_{\mu}$ ) потери мощности часто подразделяют на основные и добавочные потери. С теоретической точки зрения под добавочными потерями мощности следует подразумевать потери, связанные с явлениями, так сказать, второстепенного значения, а не с основными явлениями, которые определяют работу машины и создают в ней основные потери мощности.

Руководствуясь вышесказанным, можно установить нижеследующее подразделение потерь мощности в машине постоянного тока.

### *I. Механические потери мощности ( $Q_m$ )*

- 1) Потери мощности на трение щеток на коллекторе ( $Q_r$ ).
- 2) Потери мощности на трение в подшипниках ( $Q_R$ ).
- 3) Потери мощности на вентиляцию ( $Q_v$ ), состоящие из: а) потерь на трение о воздух вращающихся частей эл. машины ( $Q_{v1}$ ); б) потерь на вентиляционную работу ( $Q_{v2}$ ).

### *II. Электрические потери мощности ( $Q_e$ )*

#### *а) Основные эл. потери мощности:*

- 1) Потери мощности в эл. сопротивлении обмотки якоря (происходящие по закону Джоуля-Ленца), иначе, основные потери в обмотке якоря ( $Q_a$ ).
- 2) Потери мощности в эл. сопротивлениях обмоток, последовательно соединенных с обмоткой якоря (если они имеются): а) потери в последовательной

<sup>1</sup> В настоящее время намечается тенденция заменить термин «потери в железе» на «потери в стали» на том основании, что подвергающиеся перемагничиванию участки магнитных цепей делают, как правило, из ферромагнитного материала, который в металлургии называется сталью. Сталью называют сплав железа (основа) с углеродом (до 1,7%) и с другими примесями (металлы и металлоиды), вводимыми для нужных изменений качеств сплава. Эта тенденция нам представляется чрезмерным ригоризмом, поскольку наименование «потери в железе» четко отмечает основу материала, так же как и наименование «потери в меди»; ведь из чистой (100%) меди эл. цепи, как известно, не делают.

возбуждающей обмотке ( $Q_s$ ), б) потери в обмотке добавочных полюсов ( $Q_w$ ); в) потери в компенсационной обмотке ( $Q_c$ ).

3) Потери мощности в эл. сопротивлении параллельной возбуждающей обмотки ( $Q_n$ ).

4) Потери мощности в переходном слое щеток на коллекторе (переходные щеточные потери мощности) ( $Q_B$ ).

### β) Добавочные эл. потери мощности

1) Добавочные потери мощности на вихревые токи в обмотке якоря, вызываемые зубчатым строением якоря.

2) Добавочные потери мощности на вихревые токи в обмотке якоря, связанные с процессом коммутации, — добавочные коммутационные потери.

3) Добавочные потери мощности на вихревые токи в коллекторных пластинах.

## III. Магнитные потери мощности ( $Q_\mu$ )

### α) Основные магнитные потери мощности

1) Потери мощности на гистерезис в сердечнике якоря ( $Q_{ha}$ ) и в зубцах якоря ( $Q_{hz}$ ) — основные гистерезисные потери при холостом ходе эл. машины.

2) Потери мощности на вихревые токи в сердечнике якоря ( $Q_{fa}$ ) и в зубцах якоря ( $Q_{fz}$ ) — основные вихревые потери при холостом ходе эл. машины.

### β) Добавочные магнитные потери мощности

1) Потери мощности на гистерезис и вихревые токи в полюсных башмаках.

2) Увеличение магнитных потерь мощности вследствие искажения при нагрузке распределения магнитного потока в зазоре из-за реакции якоря.

Все перечисленные потери мощности являются, так сказать, неизбежными потерями мощности. Кроме них, в машине могут появиться потери мощности, вызванные тем или иным недочетом в конструкции или в изготовлении машины. Их можно назвать поэтому непредвиденными потерями мощности, так, например, увеличение потерь мощности в коммутируемых секциях якорной обмотки вследствие неудовлетворительной коммутации; появление потерь мощности в болтах, стягивающих диски якорного железа (стали), в случае их неправильного расположения или плохой изоляции; увеличение потерь мощности в обмотке якоря в случае неправильного распределения якорного тока между параллельными ветвями; появление потерь мощности на вибрацию эл. машины в случае неудовлетворительного механического выполнения ее и т. п.

В дальнейшем, учитывая, что глава посвящена «потерям мощности», мы можем пользоваться в большинстве случаев сокращением «потери».

## 218. Общие соображения об опытном определении потерь мощности и к. п. д. эл. машины

При вычислении потерь мощности в машинах постоянного тока можно установить, что вследствие сложности явлений приходится, при современном состоянии теории физических процессов в машинах постоянного тока, прибегать к значительным упрощениям явлений и к широкому использованию опытных данных. По указанным причинам, вычисляя потери мощности и по к. п. д. машины постоянного тока, мы можем говорить лишь о наиболее вероятных их значениях при данном состоянии теории

При приемке-сдаче выпущенной заводом новой машины постоянного тока опытное определение ее потерь мощности и к. п. д. также возможны только с известным приближением как вследствие неизбежных неточностей методов испытаний и измерений, так и неизбежных по технологическим причинам отступлений готовой машины от расчетных данных и предположенных при расчете качеств материалов

Для того чтобы при опытном определении потерь мощности и к. п. д. эл. машин не возникало недоразумений и разных толкований, основной стандарт на эл. машины, ГОСТ 183-41, предписывает ряд положений, соблюдение которых гарантирует практическую однозначность получаемых результатов испытаний<sup>1</sup>. Эти положения, естественно, должны учитываться и при расчетном определении потерь мощности и к. п. д. эл. машин.

Главнейшие из упомянутых положений состоят в следующем.

а) Если в технических условиях заказа на эл. машину нет оговорки, то под к. п. д. машины понимается «номинальный к. п. д.», т. е. при номинальной продолжительной нагрузке (при номинальном напряжении, номинальном токе нагрузки и номинальной скорости вращения; в случае машин переменного тока, кроме того, при номинальном коэффициенте мощности).

б) На гарантированное значение к. п. д. эл. машины даются допуски (табл. 21).

Таблица 21

#### Допуски на гарантированные значения к. п. д.

1	Машины мощностью до 50 <i>квт</i> включительно . . . . .	0,20 (1— $\eta$ ), но не менее (—0,01)
2	Машины мощностью свыше 50 <i>квт</i> при опытном определении к. п. д. прямым методом . . . . .	0,15 (1— $\eta$ ), но не менее (—0,007)
3	Машины мощностью свыше 50 <i>квт</i> при опытном определении к. п. д. косвенным методом	$\begin{cases} 0,10 (1-\eta) \text{ при } \eta < 0,95 \\ 0,005 (1-\eta) \text{ при } \eta > 0,95 \end{cases}$ с округлением до третьего знака

в) Потери мощности в эл. сопротивлении обмоток эл. машин (омические или джоулевы потери) приводятся к температуре обмоток в 75° С, которая принимается неизменной как при номинальной нагрузке машины, так и при частичных значениях ее (например, при  $\frac{3}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{4}$  номинальной нагрузки).

г) Падения напряжения в контакте щеток считаются при всех нагрузках не зависящими от тока нагрузки и принимаются согласно табл. 8, вследствие этого переходные потери щеток на коллекторе считаются пропорциональными току нагрузки.

д) Основные магнитные потери мощности в машине постоянного тока считаются не зависящими от нагрузки машины и определяются при ее холостом ходе при напряжении, равном номинальному, увеличенному (в случае генератора) или уменьшенному (в случае двигателя) на падение напряжения в обмотке якоря и в контакте щеток. Увеличение магнитных потерь мощности при нагрузке из-за искажения распределения магнитного потока в зазоре учитывается в добавочных потерях эл. машины.

е) Коммутационные потери мощности, увеличивающие потери мощности в обмотке якоря по сравнению с потерями мощности в ее эл. сопротивлении, учитываются при номинальной нагрузке в добавочных потерях эл. машины.

<sup>1</sup> В стандарте не отмечено, но естественно, что предполагается производство (опытного определения к. п. д. машин постоянного тока магнитоэлектрическими измерительными приборами высшего класса точности с зеркальным отсчетом показаний приборов, и что до испытания все приборы были проверены компетентной организацией и имеют соответствующие поверочные удостоверения, наконец необходимо, чтобы между временем проверки приборов и применением их при испытании эл. машины приборы не были в работе, без этого надежность показаний приборов может стать под сомнение



ж) Добавочные потери мощности в обмотке якоря и добавочные магнитные потери мощности учитываются 1% от полезной мощности в случае генератора и от подведенной мощности — в случае двигателя; при частичных нагрузках (в долях номинальной) добавочные потери считаются пропорциональными квадрату долевого значения частичной нагрузки; так, при номинальной нагрузке добавочные потери берутся равными 1%, а при 2 номинальной нагрузки они равны  $\left(\frac{1}{2}\right)^2 \cdot 0,01 = 0,0025$ .<sup>1</sup>

з) Механические потери энергии надлежит определять при номинальной скорости вращения машины и при установившейся температуре подшипников; последнее важно при подшипниках скольжения, в которых потери на трение с повышением температуры подшипников падают; при подшипниках качения потери на трение практически от температуры их не зависят.<sup>2</sup>

и) При определении к. п. д. машины постоянного тока необходимо отнести к ее потерям нижеследующие потери мощности во вспомогательных аппаратах и приборах:

1) потери мощности в регулировочных реостатах и постоянно включенных эл. сопротивлениях, необходимых для работы машины в номинальном режиме нагрузки; при этом потери мощности в механических приспособлениях для измерения скорости вращения машины не учитываются.

2) Потери мощности в возбудителе и подвозбудителе, если они сидят на одном валу с испытуемой машиной.

3) Потери мощности в подшипниках, доставляемых с эл. машиной; таким образом, если машина имеет только один подшипник, а вторым служит подшипник механизма, сочленяемого с эл. машиной, то потери в нем относятся к механизму.

4) Потери мощности в вентиляторе, сидящем на валу эл. машины.

К потерям мощности эл. машины не относятся потери на вращение отдельно стоящего вентилятора, а также на вращение отдельно стоящих водяных и масляных электронасосов системы охлаждения как самой испытуемой машины, так и ее подшипников; при испытании эл. машины эти потери должны определяться и указываться отдельно.

## Б. ВЫЧИСЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В МАШИНЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 219. Вычисление потерь мощности на трение щеток о коллектор

Эти потери мощности можно вычислить по общей формуле для потерь мощности на трение, согласно которой они равны произведению силы трения на путь. Применяя это к нашему случаю и определяя потери мощности в единицу времени, нужно путь заменить через окружную скорость по коллектору  $v_k$ , а силу трения  $F_r$  через давление щетки на коллектор, умноженное на коэффициент трения щетки о коллектор  $\mu_B$ . Обозначая через  $p_B$  давление на единицу поверхности соприкосновения щетки с коллектором и через  $S_\Sigma$  площадь контакта всех щеток с коллектором, можем для силы трения написать.

$$F_r = \mu_B p_B S_\Sigma.$$

<sup>1</sup> Стандарт ГОСТ 183-41 не делает разницы между компенсированными и некомпенсированными машинами постоянного тока. Имеющиеся данные показывают, что для компенсированных машин следовало бы принять добавочные потери равными 0,5%.

<sup>2</sup> Колебание потерь на трение в подшипниках скольжения в зависимости от температуры окружающего воздуха в стандарте не учитывается. Эта разница, повидимому, покрывается допуском на к. п. д., если, как обычно, испытание эл. машины делается при окружающей температуре воздуха, лежащей между  $+10^\circ \text{C}$  и  $+25^\circ \text{C}$ .



Таким образом, потери мощности на трение щеток о коллектор будут

$$Q_r = \mu_B p_B S_\Sigma v_k. \quad (485)$$

Здесь  $\mu_B$  — безразмерная величина; выражая  $p_B$  в  $\text{кг/см}^2$ ,  $S_\Sigma$  — в  $\text{см}^2$ ,  $v_k$  — в  $\text{м/сек}$ , получим потери в  $\text{кгм/сек}$ ; для получения их в ваттах нужно выражение (485) умножить на 9,81:

$$Q_r = 9,81 \mu_B p_B S_\Sigma v_k [\text{вт}].$$

При выбранной плотности тока под щеткой  $j_B$  (в  $\text{а/см}^2$ ) общая площадь контакта всех щеток

$$S_\Sigma = \frac{2I_N}{j_B}, \quad (486)$$

где  $I_N$  — номинальный ток машины.

В стандарте на щетки для эл. машин (ГОСТ 2332-43) приведены для каждой марки щетки значения  $\mu_B$  при скорости  $v_k = 15 \text{ м/сек}$  и пределы допускаемых давлений  $p_B$ . При  $v_k > 15 \text{ м/сек}$ , значение  $\mu_B$  несколько падает. В стандарте указаны и другие величины, характеризующие марку щетки, в том числе допустимая наибольшая плотность тока под щеткой  $j_B$ .

При проектировании машины постоянного тока, когда марка щетки еще не выбрана, берут для угольно-графитовых, графитовых и электрографитовых щеток.  $\mu_B = 0,20$ ;  $p_B = 0,20 \text{ кг/см}^2$

## 220. Вычисление потерь мощности на трение в подшипниках

Эти вопросы составляют особый раздел прикладной механики, имеющий особо важное значение для больших и быстроходных эл. машин. Здесь мы сможем коснуться этих вопросов только в общих чертах, необходимых для выяснения существа дела.

а) Потери мощности в подшипниках скольжения. В этих подшипниках шейка вала вращается в неподвижном вкладыше подшипника, причем при вращении машины между шейкой и вкладышем все время имеется тонкий слой жидкого масла. Вследствие этого, вместо трения металла о металл, связанного с большими потерями мощности, мы получаем трение одного слоя масла, смачивающего шейку, о другой слой масла, смачивающий вкладыш подшипника, т. е. так называемое жидкое трение, значительно меньшее. При покое машины шейка под влиянием веса вала и якоря с коллектором выжимает масло в нижней части, под шейкой, вследствие чего в момент пуска в ход получается так называемое полужидкое трение. Для того чтобы при этом не происходило заедания подшипника и порчи его и шейки, вкладыш делают из специальных сплавов,<sup>1</sup> учитывая при этом величину удельного давления, создаваемого шейкой. Под удельным давлением  $p_z$  здесь понимают давление, приходящееся на единицу проекции шейки на горизонтальную плоскость (фиг. 304):

$$p_z = \frac{P_z}{d_z l_z}. \quad (487)$$

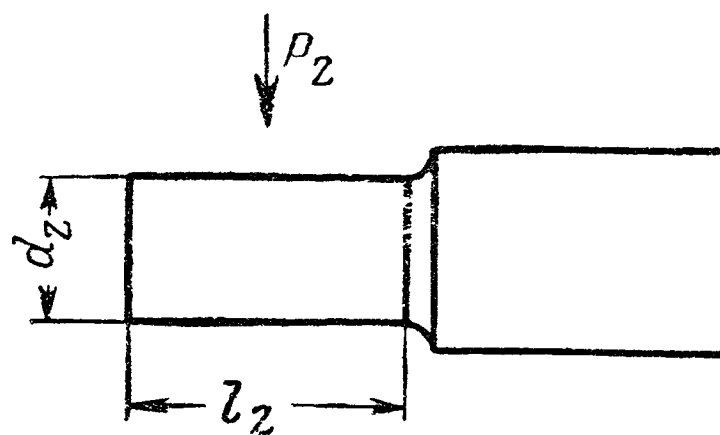
Здесь  $d_z$  и  $l_z$  — диаметр и длина шейки,  $P_z$  — полное давление шейки вала на вкладыш подшипника. Выражая  $d_z$  и  $l_z$  — в  $\text{см}$ , а  $P_z$  — в  $\text{кг}$ , получаем  $p_z$  в  $\text{кг/см}^2$

Смазка подшипников со скользящим трением осуществляется посредством специальных колец

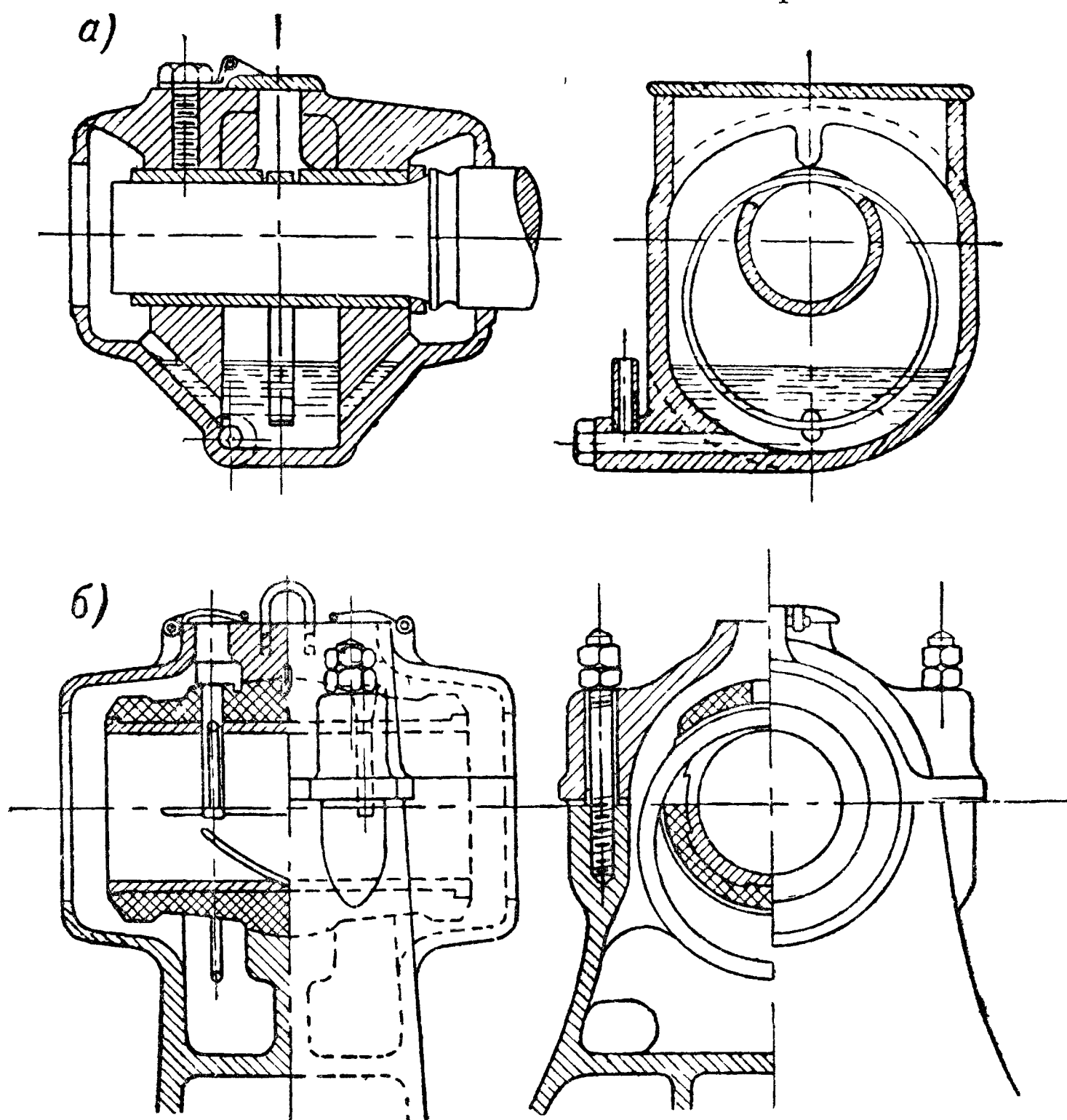
<sup>1</sup> Подшипниковые или антифрикционные сплавы

При нормальных скоростях вращения электрических машин смазка получается вполне удовлетворительной при наличии одного кольца (фиг. 305, а) на 300—400 мм длины вкладыша, однако обычно, начиная уже со вкладышей длиной 150—200 мм, прибегают к двум смазочным кольцам (фиг. 305, б) в целях увеличения надежности работы подшипника.

Первый теоретический разбор проблемы трения в подшипниках скольжения был сделан Н. П. Петровым в 1883 г.<sup>1</sup> Установив, что в подшипниках скольжения мы имеем дело с внутренним трением жидкости, Петров положил начало гидродинамической теории трения в подшипниках скольжения. В дальнейшем эта теория разрабатывалась как самим Петровым, так и многими другими авторами. Математические трудности и сложность проблемы не дали возможности в течение 40 лет придать теории такой вид, чтобы на основании ее можно было рассчитывать подшипники



Фиг. 304 Иллюстрация к определению давления во вкладыше подшипника скольжения.



Фиг. 305 Подшипники скольжения. а — с одним смазочным кольцом; б — с двумя смазочными кольцами.

скольжения. По этой причине ряд исследователей пошел по иному пути и стал трактовать условно трение в подшипниках скольжения так, как будто мы имеем трение твердых тел, т. е. на основании теории трения твер-

<sup>1</sup> Н. П. Петров, Трение в машинах и влияние на него смазывающих масел. «Инженерный журнал», 1883.

дых тел (закон Кулона). Исходя из этого закона и вычисляя потери в ваттах мы можем для потерь в подшипнике скольжения написать:

$$Q_R = 9,81 F_R v_z [вт], \quad (488)$$

где  $F_R$  — сила трения в кгм,  $v_z$  — окружная скорость шейки вала в м/сек.

Для силы трения по закону трения твердых тел можно написать:

$$F_R = \mu_z P_z, \quad (489)$$

где  $P_z$  — давление шейки на вкладыш,  $\mu_z$  — коэффициент трения.

Используя сделанные указания, имеем:

$$F_R = \mu_z p_z d_z l_z$$

Вследствие этого вместо (488) имеем:

$$Q_R = 9,81 \mu_z p_z d_z l_z v_z [вт]. \quad (490)$$

Здесь  $\mu_z$  — безразмерная величина,  $d_z$  и  $l_z$  — в см;  $p_z$  — в кг/см<sup>2</sup>,  $v_z$  — в м/сек.

Очевидно, что при таком написании потерь мощности на трение в подшипниках скольжения коэффициент трения  $\mu_z$  не будет величиной постоянной, как это имеет место в законе трения твердых тел. Поэтому пришлось заняться выяснением зависимости  $\mu_z$  от различных факторов, влияющих на его величину.

При этом были установлены следующие зависимости:

- 1) Коэффициент  $\mu_z$  зависит от сорта смазочного масла (его вязкости)
- 2) При постоянной температуре подшипника  $\theta_z$  и постоянной скорости шейки  $v_z$ , коэффициент  $\mu_z$  изменяется обратно пропорционально удельному давлению  $p_z$ , поэтому в указанных условиях потери на трение в подшипниках скольжения не зависят от давления; это справедливо до тех пор, пока давление не превосходит 40 кг/см<sup>2</sup>, для этих условий можем написать:

$$\mu p_z = \text{const} \quad \text{при} \quad v_z = \text{const} \quad \text{и} \quad \theta_z = \text{const} \quad (p_z \leq 40 \text{ кг/см}^2). \quad (491)$$

- 3) При постоянном удельном давлении  $p_z$  (не превосходящем 40 кг/см<sup>2</sup>) и постоянной окружной скорости шейки  $v_z$  коэффициент трения  $\mu_z$  обратно пропорционален температуре смазки  $\theta_z$ , если она лежит в пределах 16—50° С; этот вывод для указанных условий можем записать так:

$$\mu_z Q_z = \text{const} \quad \text{при} \quad v_z = \text{const} \quad \text{и} \quad p_z = \text{const} \quad (p_z \leq 40 \text{ кг/см}^2, \quad \theta_z \leq 50^\circ \text{С}). \quad (492)$$

- 4) При постоянной температуре смазки  $\theta_z$  и постоянном удельном давлении  $p_z$  коэффициент  $\mu_z$  растет пропорционально  $\sqrt{v_z}$ .

Последняя зависимость была получена при окружных скоростях шейки вала  $v_z = (0,5 \div 4)$  м/сек. Позднее было установлено, что при больших скоростях  $v_z$  эта зависимость нарушается и при  $v_z > 10$  м/сек коэффициент трения  $\mu_z$  почти не зависит от  $v_z$ .

Учитывая вышесказанное, можем представить коэффициент трения  $\mu_z$  при  $p_z < 40$  кг/см<sup>2</sup>,  $\theta_z < 50^\circ \text{С}$  в следующем виде:

$$\text{если} \quad v_z < 4 \text{ м/сек}, \quad \text{то} \quad \mu_z = \frac{\kappa_z \sqrt{v_z}}{\theta_z p_z}, \quad (493a)$$

$$\text{если} \quad v_z > 10 \text{ м/сек}, \quad \text{то} \quad \mu_z = \frac{\kappa_z}{\theta_z p_z}. \quad (493b)$$

Таким образом, потери в одном подшипнике скользящего трения будут:

$$\text{при } v_z < 4 \text{ м/сек: } Q_R = 9,81 \frac{\kappa_z}{\theta_z} d_z l_z \sqrt{v_z^3} [\text{вт}], \quad (494)$$

$$\text{при } v_z > 10 \text{ м/сек: } Q_R = 9,81 \frac{\kappa_z}{\theta_z} d_z l_z v_z [\text{вт}]. \quad (495)$$

В написанных формулах  $\kappa_z$  зависит от сорта масла.

До тех пор, пока в (490) произведение  $p_z v_z < 15$ , подшипник скольжения, как показала практика, может быть выполнен с естественным самоохлаждением. При больших значениях произведения  $p_z v_z$  (при  $p_z v_z > 15$ ) приходится устраивать искусственное охлаждение подшипников скольжения посредством змеевиков с подачей воды под давлением; змеевики укладывают либо во вкладышах, либо в масляной подшипниковой ванне.

В небольших и средних машинах постоянного тока диаметр шейки  $d_z$  обычно определяют в см по эмпирической формуле

$$d_z \approx 22 \sqrt[3]{\frac{P_2}{n_N}}, \quad (496)$$

где  $P_2$  — полезная мощность эл. машины в *квт*,  $n_N$  — номинальная скорость вращения в *об/мин*. Отношение  $l_z/d_z$  лежит обычно в пределах от 1,25 до 2

Установление вышеуказанных зависимостей коэффициента  $\mu_z$  от влияющих на него факторов сыграло большую роль в электромашиностроении. Оно указало на большую роль качества смазочного масла и привело к созданию таких сортов смазочного масла, которые допускают температуру  $\theta_z = 80^\circ \text{C}$ . При принимаемой при расчете машин постоянного тока наибольшей возможной температуре окружающей среды  $\theta_0 = 35^\circ \text{C}$  ныне допускают в подшипниках скольжения превышение температуры подшипника над температурой окружающей среды  $\theta_0$  равным:

$$\vartheta_z = \theta_z - \theta_0 = 80^\circ - 35^\circ = 45^\circ \text{C},$$

что и зафиксировано в стандарте ГОСТ 183-41, § 85.

С ростом  $\theta_z$  величина  $\mu_z$  убывает; поэтому, чем больше  $\theta_z$ , тем меньше потери на трение, что объясняется уменьшением вязкости масла, однако при слишком малой вязкости масляный слой между шейкой и вкладышем начинает рваться, а это приводит к заеданию подшипника, т. е. к его выходу из работы. Поэтому при конструировании подшипника стараются не использовать предельное допустимое превышение температуры (обычно берут  $\theta_z \approx 70^\circ \text{C}$ )

После трогания эл. машины с места потери в подшипниках скольжения будут убывать, пока температура их не установится, а потому определение потерь на трение можно производить только после установления температуры подшипников.

Важным следствием результатов исследования  $\mu_z$  является также то, что потери на трение при неизменной скорости вращения эл. машины не зависят от нагрузки. В самом деле, если машина сцеплена с приводным механизмом зубчатой или ременной передачей, то до тех пор, пока удельное давление  $p_z$  не превысит  $40 \text{ кг/см}^2$ , коэффициент  $\mu_z$  убывает обратно пропорционально  $p_z$ , а поэтому потери на трение не будут изменяться. Это обстоятельство позволяет считать потери на трение в подшипниках скольжения не зависящими от нагрузки.

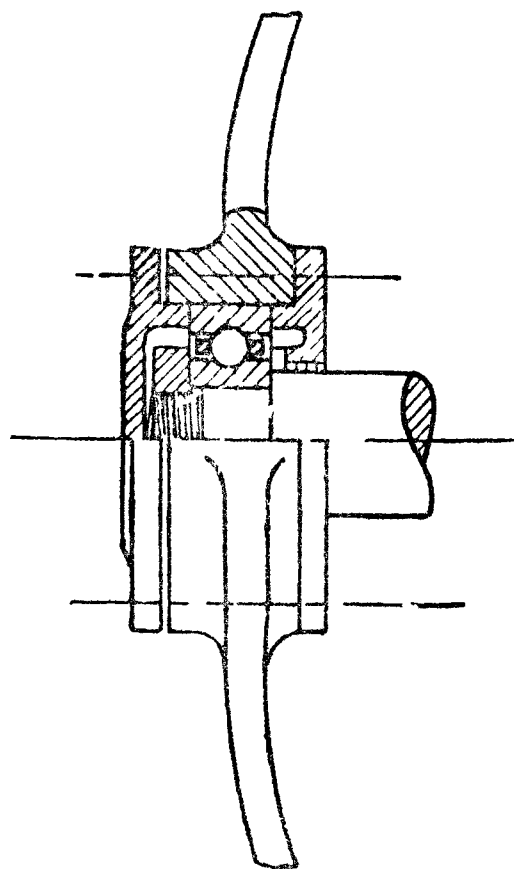
Так как на практике приходится учитывать потери  $Q_R$  вместе с потерями на вентиляцию, то обычно оценивают  $Q_R$  по опытным данным в процентах от полезной мощности эл. машины

б) Потери мощности в подшипниках качения. Потери мощности на трение в подшипниках качения составляют примерно  $1/10$  потерь на трение в подшипниках скольжения. Их можно вычислять по формуле:

$$Q_R = 0,015 \frac{P_z}{D_0} v_z [вт], \quad (497)$$

где  $P_z$  — нагрузка на кольцо подшипника качения в кг,  $D_0$  — диаметр круга центров шариков или роликов в см,  $v_z$  — окружная скорость шейки вала в м/сек (фиг. 306)

Практически потери на трение в подшипниках качения учитывают совместно с потерями на вентиляцию по опытным данным.



Фиг. 306 Шариковый подшипник

## 221. Потери мощности на вентиляцию машин постоянного тока

Как указывалось в § 217, потери на вентиляцию  $Q_V$  состоят из: 1) потерь мощности  $Q_{v1}$  на трение вращающихся частей эл. машины о воздух и 2) потерь мощности  $Q_{v2}$ , затрачиваемой на работу вентиляции. Как правило, потери  $Q_V = Q_{v1} + Q_{v2}$  учитываются вместе с потерями на трение в подшипниках по опытным данным; исключение составляют машины постоянного тока, выполняемые с подшипниками скольжения, у которых  $Q_{v2}$  учитывается отдельно.

## 222. Совместный практический учет потерь мощности на трение в подшипниках и на вентиляцию машин постоянного тока

а) При расчете малых и средних машин постоянного тока, имеющих диаметр якоря  $D_a < 500$  мм, этот учет делают по нижеследующим эмпирическим данным:

1) Если машина снабжена подшипниками качения, то сумму потерь  $Q_R + Q_V$  определяют по кривым фиг. 307.

2) Если машина снабжена подшипниками скольжения, то отдельно определяют потери мощности на трение в подшипниках  $Q_R$  и потери мощности на трение о воздух  $Q_{v1}$  и отдельно потери мощности на вентиляционную работу  $Q_{v2}$ . Сумму потерь мощности  $Q_R + Q_{v1}$  находят по эмпирической формуле:

$$Q_R + Q_{v1} = 5Gv_z \sqrt{\frac{n_N}{P_z}} \cdot 10^{-3} вт, \quad (498)$$

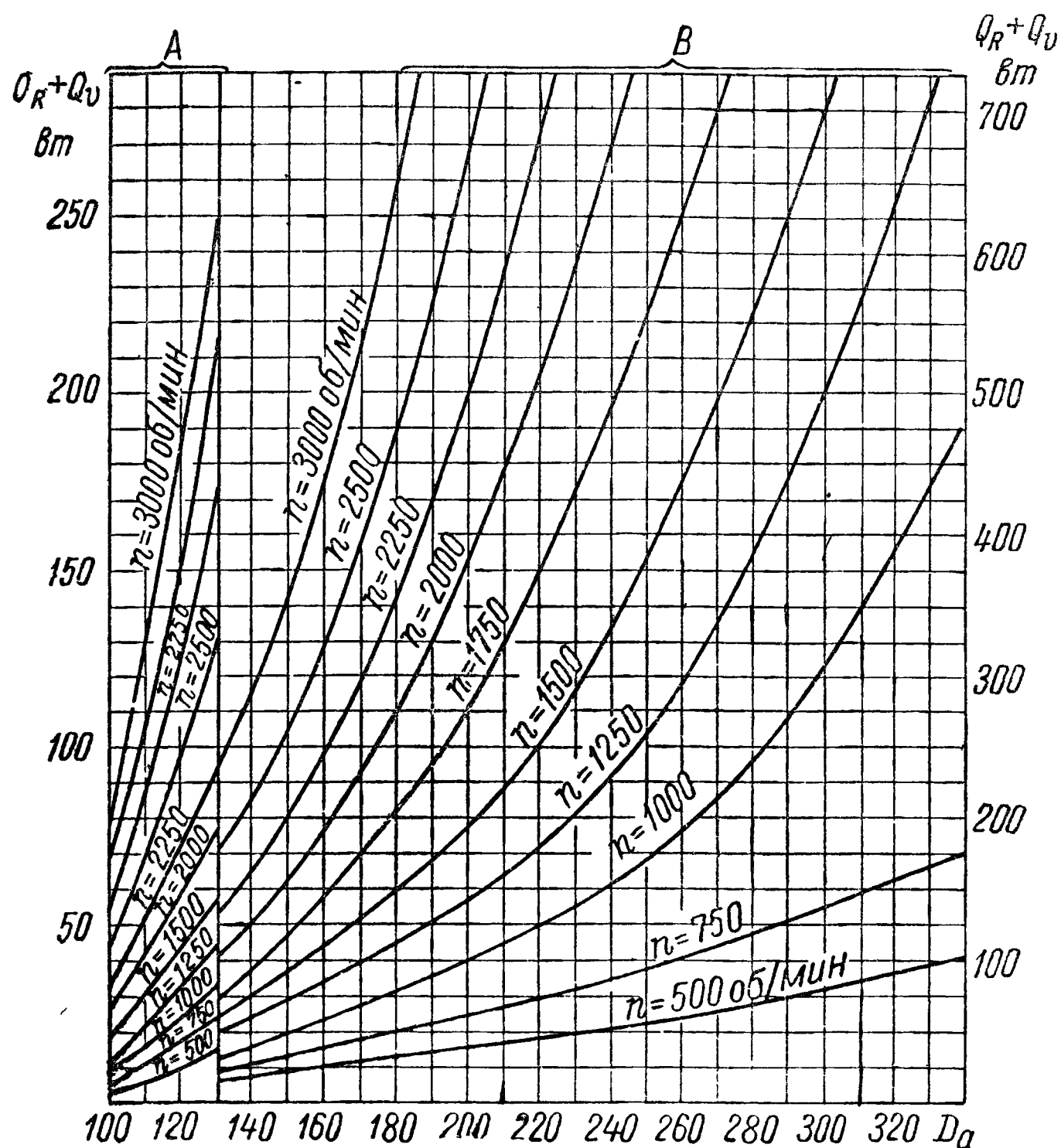
здесь  $G$  — вес вращающихся частей машины (в кг),  $n_N$  — номинальная скорость вращения машины в об/мин,  $P_z$  — удельное давление (в кг/см<sup>2</sup>) на вкладышах подшипников.

Потери мощности на работу вентиляции определяют по формуле:

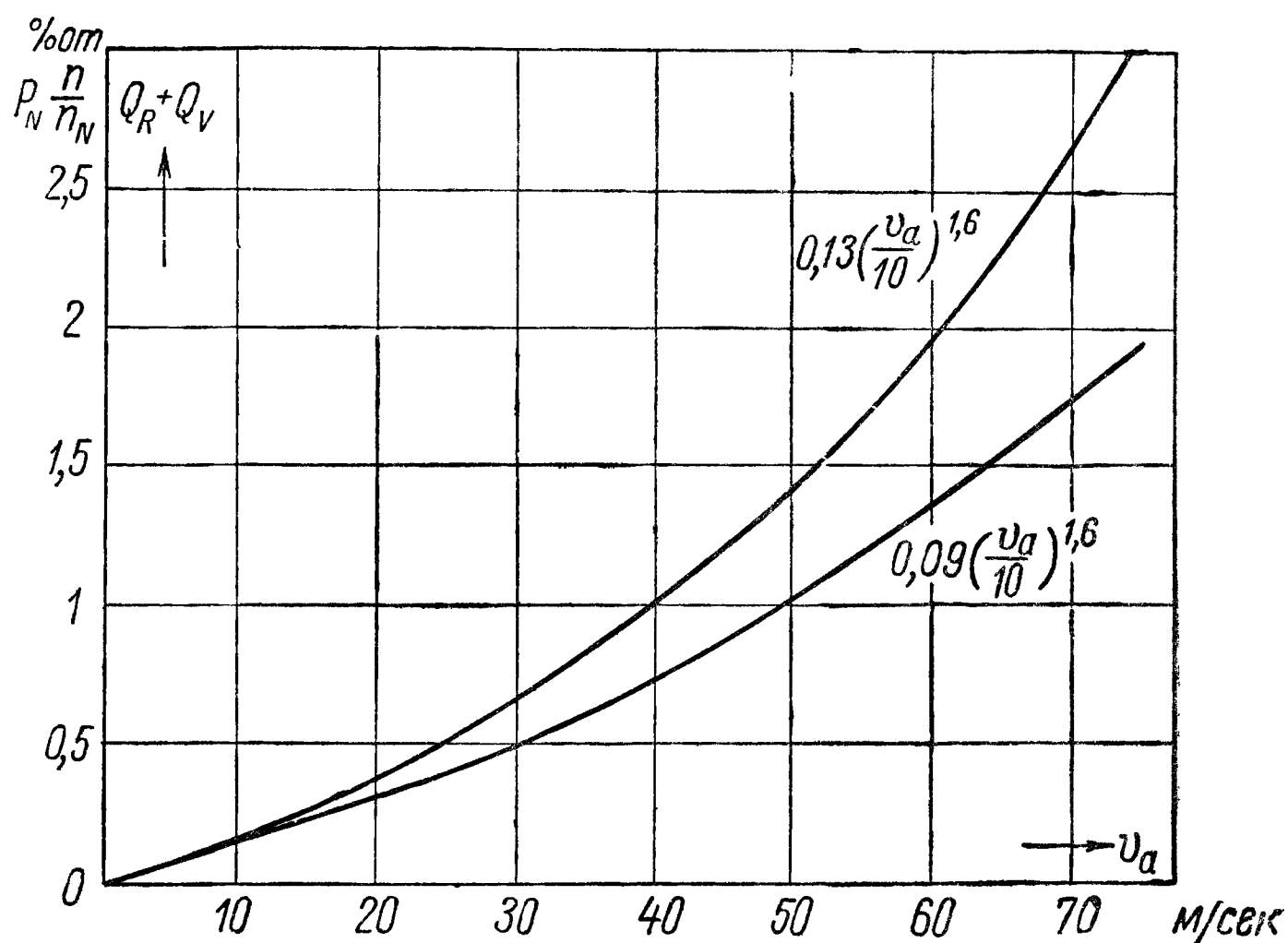
$$Q_{v2} = 1,1 v^2 O [вт],$$

где  $v$  для машин без встроенного вентилятора равна окружной скорости якоря (в м/сек), а для машин с встроенным центробежным вентилятором — окружной скорости на наружном диаметре вентиляторного колеса,  $O$  — объем воздуха, прогоняемого вентилятором, выраженный в м<sup>3</sup>/сек





Фиг. 307. Потери в подшипниках качения и на трение о воздух при диаметре якоря  $D_a < 500$  мм



Фиг. 308. Потери в подшипниках скольжения и на трение о воздух при диаметре якоря  $D_a > 500$  мм.

Таким образом, суммарные потери в подшипниках скольжения и на вентиляцию находят по формуле:

$$Q_R + Q_{v1} + Q_{v2} = 5Gv_z \sqrt{\frac{n_N}{p_z}} 10^{-3} + 1,1 v^2 O [\text{6m}]. \quad (500)$$

б) При расчете машины с диаметром якоря  $D_a > 500$  мм и вентилятором на валу потери  $Q_R + Q_v$  определяют по кривым фиг. 308, на которой по оси

ординат отложены потери  $(Q_R + Q_V)$  в процентах от величины  $\frac{P_N n}{n_N}$ , или по формуле:

$$Q_R + Q_V = \xi \left( \frac{v_a}{10} \right)^{1,6} P_N \frac{n}{n_N} [\text{вт}], \quad (501)$$

где коэффициент  $\xi = 0,09 \div 0,13$ ,  $v_a$  — окружная скорость якоря машины в м/сек,  $n$  — скорость вращения, для которой определяются механические потери мощности  $Q_R + Q_V$ ,  $n_N$  — номинальная скорость вращения машины

## В. ВЫЧИСЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В МАШИНЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 223. Вычисление эл. сопротивления электромашиной обмотки

Обозначим для любой электромашиной обмотки, независимо от ее назначения:  $w$  — число витков обмотки,  $l_{\text{med}}$  — средняя длина витка обмотки;  $s$  — площадь сечения витка обмотки,  $c$  — число параллельных групп, в которые соединены витки обмотки,  $\rho_\theta$  — удельное эл. сопротивление материала, из которого сделана обмотка, определенное при температуре  $\theta$ . Тогда для сопротивления обмотки  $R$  можем написать по закону Ома:

$$R = \rho_\theta \frac{wl_{\text{med}}}{sc}. \quad (502)$$

Удельное эл. сопротивление  $\rho_\theta$ , зависящее от температуры обмотки  $\theta$ , определяется через удельное эл. сопротивление обмотки  $\rho_{20}$  при температуре  $\theta = 20^\circ \text{C}$  следующим образом:

$$\rho_\theta = \rho_{20} (1 + \alpha \vartheta) = \rho_{20} [1 + \alpha (\theta - 20)], \quad (503)$$

где

$$\vartheta = \theta - 20 \quad (504)$$

— превышение температуры обмотки  $\theta$  над температурой  $20^\circ \text{C}$ , для которой известно удельное эл. сопротивление  $\rho_{20}$  материала обмотки;  $\alpha$  — температурный коэффициент возрастания эл. сопротивления материала обмотки.

Таким образом,

$$R = \rho_{20} [1 + \alpha (\theta - 20)] \frac{wl_{\text{med}}}{sc}. \quad (505)$$

Так как в электротехнике площадь сечения проводника, из которого делается обмотка, обычно измеряется в  $\text{мм}^2$ , длина  $l_{\text{med}}$  — в  $\text{см}$ , эл. сопротивление — в омах, то удельное эл. сопротивление  $\rho_{20}$  должно быть вычислено в  $\frac{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ , и выражение для  $R$  (505) принимает такой вид:

$$R = \rho_{20} [1 + \alpha (\theta - 20)] \frac{wl_{\text{med}}}{100sc} [\text{ом}]. \quad (506)$$

Так как для меди, из которой обычно делают обмотки,  $\rho_{20} = 0,01754 \approx \frac{1}{57} \frac{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ , а коэффициент возрастания с температурой эл. сопротивления обмотки  $\alpha_{\text{Cu}} = 0,004$ , то для обмотки, сделанной из меди, имеем:

$$R = [1 + 0,004 (\theta - 20)] \frac{wl_{\text{med}}}{5700sc}, \quad (507)$$

здесь  $s$  — в  $\text{мм}^2$ ,  $l_{\text{med}}$  — в  $\text{см}$ ,  $\theta$  — в  $^\circ \text{C}$ ,  $c$  — число параллельных ветвей обмотки,  $w$  — число витков обмотки.

### 224. Вычисление основных потерь мощности в сопротивлении обмотки якоря

Применяя выражение (507) к обмотке якоря, имеем.  
 $c = 2a$  — число параллельных ветвей якорной обмотки,  
 $w_a = \frac{N}{2 \cdot 2a}$  — число витков в одной ветви якорной обмотки при общем числе  $N$  ее активных проводников,  
 $l_{med} = 2 l_a$ ,  $l_a$  — средняя длина полувитка якорной обмотки в см;  
 $s = s_a$  — площадь сечения провода обмотки якоря в мм<sup>2</sup>  
 Подставляя эти значения в (507), получаем:

$$R_a = \frac{N}{(2a)^2} \frac{l_a [1 + 0,004 (\theta - 20)]}{5700 s_a} \text{ [ом]}. \tag{508}$$

Средняя длина полувитка якорной обмотки  $l_a$  определяется по чертежу эл. машины, при предварительных расчетах можно принять:  
 для двухполюсных ( $2p = 2$ ) машин постоянного тока:

$$l_a = l_{\Sigma} + 1,25 D_a + 5, \tag{509}$$

для многополюсных ( $2p > 2$ ) машин постоянного тока

$$l_a = l_{\Sigma} + 1,4 \tau_a + 5, \tag{510}$$

где  $l_{\Sigma}$  — длина сердечника якоря с радиальными вентиляционными каналами (если они имеются);  $\tau_a$  — полюсное деление якоря; все размеры — в см

Потери  $Q_a$  в эл сопротивлении  $R_a$  якорной обмотки по закону эл потерь (закону Джоуля и Ленца):

$$Q_a = I_a^2 R_a \text{ [вт]}. \tag{511}$$

Здесь  $I_a$  — в амперах,  $R_a$  — в омах.

### 225. Вычисление потерь мощности в сопротивлениях обмоток, последовательно соединенных с обмоткой якоря

Таких обмоток может быть три: 1) обмотка добавочных полюсов (индекс  $w$ ), 2) компенсационная обмотка (индекс  $c$ ), 3) последовательная возбуждающая обмотка (индекс  $s$ ). По первым двум обмоткам, непосредственно соединяемым с якорем, проходит ток якоря  $I_a$ , а по последовательной возбуждающей обмотке, в случае машины со смешанным возбуждением, имеем, в зависимости от того, устроено ли короткое или длинное ответвление,

$$I_s = I_a - I_n \quad \text{либо} \quad I_s = I_a.$$

Для потерь в перечисленных выше обмотках имеем

$$Q_w = I_a^2 R_w; \quad Q_c = I_a^2 R_c, \quad Q_s = I_s^2 R_s. \tag{512}$$

Здесь  $R_w$ ,  $R_c$  и  $R_s$  вычисляются по (507) при подстановке соответствующих значений  $l_{med}$ ,  $s$  и  $\rho_{20}$  (для материала обмотки, обычно медь).

Значения сопротивлений обмоток должны быть увеличены на сопротивления соединительных шин между отдельными частями каждой из них и между разными обмотками. Сечения и длина шин берутся по чертежу.

### 226. Вычисление потерь мощности в сопротивлении параллельной возбуждающей обмотки

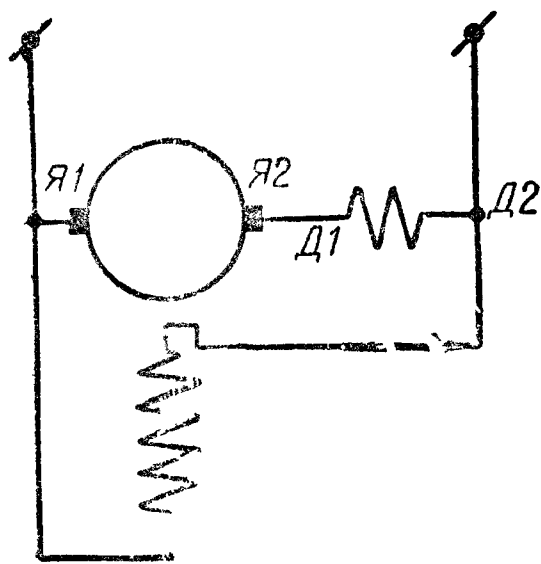
При вычислении потерь  $Q_n$  в цепи параллельной возбуждающей обмотки, содержащей, как правило, регулировочный реостат, потери в этом реостате также должны быть учтены. По этой причине потери  $Q_n$  рационально вычислять по току в этой цепи и по напряжению на ее зажимах

Обычно в параллельных машинах постоянного тока цепь параллельной возбуждающей обмотки приключают не непосредственно к зажимам якоря, а к внешним зажимам машины, к которым выводится один зажим якоря непосредственно — зажим *Я1* на фиг. 309, и зажим *Д2*, вследствие чего на зажимах цепи параллельной возбуждающей обмотки имеем напряжение, равное напряжению на зажимах машины  $U$ ; оно меньше чем напряжение на зажимах якоря  $U_a$  на величину падения напряжения в обмотке добавочных полюсов и компенсационной обмотке:

$$U = U_a - I_a(R_w + R_c). \quad (513)$$

Если имеется еще последовательная возбуждающая обмотка и взято длинное ответвление, то напряжение на зажимах машины определится из выражения:

$$U = U_a - I_a(R_w + R_c) - I_a R_s = U_a - I_a(R_w + R_c + R_s). \quad (514)$$



Устраивая присоединение параллельной возбуждающей обмотки попрежнему к зажимам *Я1* и *Д2* (короткое ответвление), мы получим на зажимах цепи параллельной обмотки напряжение, большее на величину  $I_a R_s$ . Однако разница, вследствие малости  $R_s$ , невелика, и обычно определяют  $Q_n$  по току  $i_n$  и по напряжению на зажимах машины  $U$ :

$$Q_n = i_n U. \quad (515)$$

Фиг. 309. Присоединение параллельной возбуждающей обмотки к цепи якоря

Очевидно, что вместо этого выражения можно написать:

$$Q_n = i_n^2 (r_n + r_b) = i_n^2 R_n, \quad (515a)$$

где  $R_n = r_n + r_b$ , причем  $r_n$  — эл. сопротивление параллельной возбуждающей обмотки, а  $r_b$  — эл. сопротивление регулировочного реостата.

Нагревание параллельной возбуждающей обмотки будет зависеть только от мощности, теряемой в ней непосредственно, т. е. от потерь мощности в самой обмотке, которые будут равны:

$$Q_n' = i_n^2 r_n. \quad (516)$$

Пользуясь для  $r_n$  общим выражением (507) и снабжая индексом  $n$  соответствующие параметры, имеем:

$$r_n = \varrho_{20} \frac{[1 + 0,004(\theta - 20)] l_n w_n}{5700 s_n a_n}, \quad (517)$$

где  $w_n$  — полное число витков параллельной возбуждающей обмотки;  $l_n$  — средняя длина одного витка в см;  $s_n$  — площадь сечения провода витка в  $\text{мм}^2$ ,  $a_n$  — число параллельных ветвей, на которые разбита параллельная возбуждающая обмотка, в большинстве случаев  $a_n = 1$ .

Тогда

$$Q_n' = \frac{i_n^2 l_n w_n [1 + 0,004(\theta - 20)]}{5700 s_n}. \quad (518)$$

Обозначим  $i_n / s_n = j_n$  — плотность тока (в  $\text{а/мм}^2$ ) в обмотке, тогда

$$i_n^2 = s_n^2 j_n^2. \quad (519)$$

Используя это выражение, имеем:

$$Q_n' = j_n^2 \varrho_{20} [1 + 0,004(\theta - 20)] \left\{ \frac{s_n l_n w_n}{100} \right\} [\text{вт}]. \quad (520)$$

Если выражение, стоящее в фигурных скобках, разделить на  $10^3$ , то получим объем меди обмотки  $V_n$  в  $\partial\text{м}^3$ :

$$V_n = \frac{s_n l_n w_n}{100 \times 1000} [\partial\text{м}^3]$$

Отсюда

$$\frac{s_n l_n w_n}{100} = V_n \cdot 1000 \text{ см}^3. \quad (521)$$

Подставляя это в (520), получаем.

$$Q_n' = j_n^2 e_{20} [1 + 0,004 (\theta - 20)] V_n \cdot 10^3 \text{ вт}. \quad (522)$$

Здесь  $V_n$  — в  $\partial\text{м}^3$ .

Этим выражением для потерь мощности в параллельной обмотке возбуждения мы воспользуемся в дальнейшем. Очевидно, что оно годится и для любой электромашиной обмотки — якорной, коммутационной, компенсационной, последовательной возбуждающей, с соответствующей заменой индексов у символов.

Умножив и разделив (522) на плотность отоженной меди  $\gamma = 8,89 \text{ кг}/\partial\text{м}^3$ , получим.

$$Q_n' = j_n^2 e_{20} [1 + 0,004 (\theta - 20)] \frac{G_n}{\gamma} 10^3 [\text{вт}], \quad (523)$$

где

$$G_n = \gamma V_n [\text{кг}] \quad (524)$$

— вес меди обмотки возбуждения в кг

## 227. Вычисление потерь мощности в переходном слое щеток на коллекторе

Как мы видели (гл. VI, § 162), эл. сопротивление контакта щетки  $R_B$  на вращающемся коллекторе весьма неустойчиво и зависит от многих причин. от материала щетки, от плотности тока под щеткой, от направления тока (от щетки к коллектору или обратно), от окружной скорости по коллектору, от нажима щеток, от состояния коллектора и т. д. Зависимость эл. сопротивления  $R_B$  от разных изменяющихся обстоятельств, его неустойчивость, а также трудность и ненадежность его опытного определения в обычных условиях испытания машин постоянного тока побудили к тому, чтобы как при расчете машины постоянного тока, так и при опытном определении отдельных потерь для вычисления по ним к. п. д. машины постоянного тока (при приемке-сдаче машины) принимать падение напряжения под всеми положительными и под всеми отрицательными щетками одинаковым и равным среднему значению падения напряжения  $\Delta U_B$  при номинальном токе якоря  $I_a = I_{aN}$ . Среднее значение  $\Delta U_B$ , которое можно принять для щеток одной полярности:

при обычных (угольных, графитовых и электрографитовых) щетках (ГОСТ 183-41, § 118)

$$\Delta U_B = I_{aN} R_B = 1 \text{ в},$$

при медно-угольных щетках

$$\Delta U_B = I_{aN} R_B = 0,3 \text{ в}.$$



Таким образом, суммарное падение напряжения под щетками обеих полярностей, в зависимости от двух категорий щеток, будет:

$$2\Delta U_B = 2\varepsilon \quad \text{либо} \quad 2\Delta U_B = 0,6 \varepsilon, \quad (525)$$

а потери мощности в переходном слое на коллекторе:

при угольных, графитовых и электрографитовых щетках

$$Q_B = 2\Delta U_B I_N = 2I_N [\text{вт}]; \quad (526 \text{ а})$$

при медно-угольных щетках

$$Q_B = 2\Delta U_B I_N = 0,6 I_N [\text{вт}]. \quad (526 \text{ б})$$

В значительном диапазоне нагрузки машины постоянного тока переходное эл. сопротивление контакта щетки изменяется, при прочих неизменных условиях, обратно пропорционально плотности тока под щеткой или, что то же (при данной площади контакта щетки), обратно пропорционально току якоря

К. п. д. машин постоянного тока определяют обычно для нагрузок от  $1/4$  до  $4/4$  номинальной нагрузки и принимают, что в этом диапазоне падение напряжения в переходном слое щеток на коллекторе остается неизменным. Отсюда следует, что потери мощности в контакте щеток принимают, по необходимости, условно.

При небольших номинальных напряжениях потери  $Q_B$  составляют значительный процент и тем больший, чем меньше номинальное напряжение; в то же время при номинальных напряжениях в несколько сот вольт процентное значение  $Q_B$  невелико. Так, при угольных щетках и при  $U_N = 220 \text{ в}$  они составляют всего  $\frac{2}{220} 100 = 0,91\%$ , и указанная условность в определении  $2\Delta U_B$  и  $Q_B$  практически не сказывается на значении к. п. д.  $\eta$  и покрывается допуском на опытное значение  $\eta$  (§ 218).

## 228. Учет добавочных потерь мощности в обмотке якоря

При вычислении потерь в машине постоянного тока для нахождения ее к. п. д. добавочные потери в обмотке якоря учитывают некоторой процентной надбавкой к сумме прочих потерь энергии в машине, руководствуясь соображениями, указанными в § 218, п. «ж».

Так как добавочные потери мощности в обмотке якоря нагревают ее, то расчетное определение их может понадобиться для предварительного определения превышения температуры якорной обмотки над температурой окружающего воздуха

а) **Добавочные потери мощности на вихревые токи, вызываемые укладкой якорной обмотки в пазах якоря.** При переходе магнитного потока из зазора в якорь магнитные линии концентрируются в зубцах якоря и при вращении якоря переходят из одного зубца якоря в другой. При этом, как видно из фиг. 310, густота магнитных линий в разных частях проводников якоря неодинаковая, причем они изгибаются, и их можно разбить на продольные и поперечные магнитные линии. Потерями мощности от вихревых токов, создаваемых в проводниках якоря продольными радиальными магнитными линиями, можно обычно пренебречь, в случае же широких проводников эти потери мощности можно свести к исчезающе малой величине путем расщепления проводов на несколько частей по радиусам якоря (фиг. 310). Образующийся окисел на соприкасающихся сторонах подразделенного сечения в большинстве случаев будет служить достаточной изоляцией.

От поперечных магнитных линий в пазах якоря будут возникать некоторые добавочные потери мощности на вихревые токи. Для уменьшения их приходится избегать чересчур глубоких пазов и больших индукций в зубцах и иногда прибегать к проводникам, сделанным из большого числа мелких скрученных проводников, из жгутов. Устройство таких проводников уменьшает, конечно, полезное сечение проводников, а следовательно, дает некоторое увеличение потерь от эл. сопротивления проводников по сравнению с сопротивлением в массивных проводниках, но зато почти на нет сводит указанные добавочные потери мощности от вихревых токов.

Подсчет этих добавочных потерь мощности сложен и возможен лишь приближенно.

Треттин приводит [Л. 18] следующую приближенную формулу для подсчета потерь в единице объема меди ( $1 \text{ см}^3$ ) пазовой части якоря от поперечного поля пазов

$$q_{\sigma} = 3h^2 f^2 \left( \frac{B_z}{1000} - 16 \right)^2 \cdot 10^{-6} \text{ [вт/см}^3\text{]}$$

Здесь  $h$  — высота стержня, см,

$f$  — частота перемагничивания якоря,

$B_z$  — теоретическая индукция в зубце.

Так, например, при  $h = 1,4 \text{ см}$ ;  $f = 50 \text{ гц}$ ;  
 $B_z = 20\,000 \text{ гс}$  будем иметь:

$$q_{\sigma} = 0,234 \text{ вт/см}^2.$$

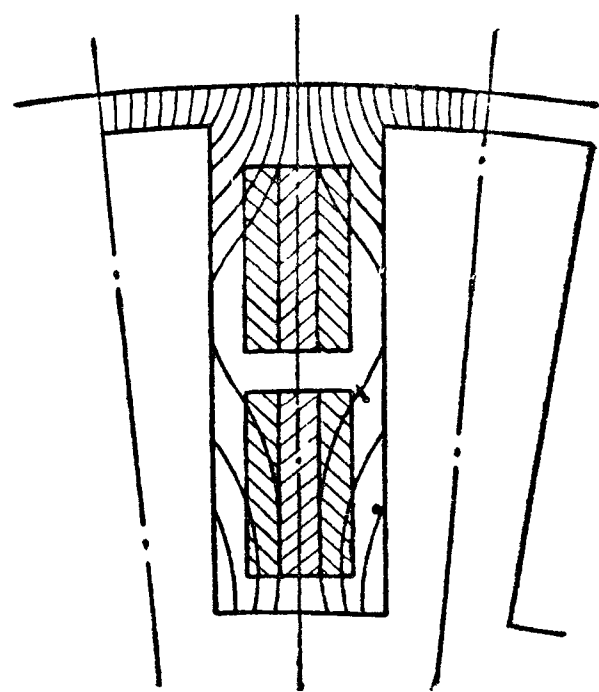
При опытном определении потерь мощности в машине эти потери, как существующие и при холостом ходе машины, хотя и в несколько уменьшенном размере, учитываются при определении основных магнитных потерь (§ 243).

**б) Добавочные потери мощности на вихревые токи в коммутируемых секциях якорной обмотки.** До второго десятилетия текущего столетия этим потерями мощности совсем пренебрегали. Поставленные опыты и теоретическое рассмотрение вопроса на основе разработанной в начале века теории вытеснения переменного тока в проводниках якорных обмоток машин переменного тока показали, что эти потери могут достигать до 30% от потерь в эл. сопротивлении при постоянном токе и что, следовательно, учет их необходим.

Сложное обоснование теории вопроса приводится обычно в курсе машин переменного тока, здесь мы можем ограничиться лишь кратким изложением существа дела.

За период коммутации  $T$  одной секции, продолжительность которого измеряется сотыми долями секунды, ток в коммутируемой секции и создаваемое им поле магнитного рассеяния должны изменить свое направление на обратное. Эта пульсация магнитного потока рассеяния коммутируемых секций генерирует в проводниках якоря вихревые токи.<sup>1</sup>

Вследствие того что частота пульсаций потока магнитного рассеяния очень велика, получается явление поверхностного эффекта, т. е. токи распространяются по наружным слоям проводников и создают в них добавочные потери мощности; назовем их коммутационными потерями мощности и обозначим через  $Q_K$



Фиг. 310. Распределение в пазах якоря основного магнитного потока.

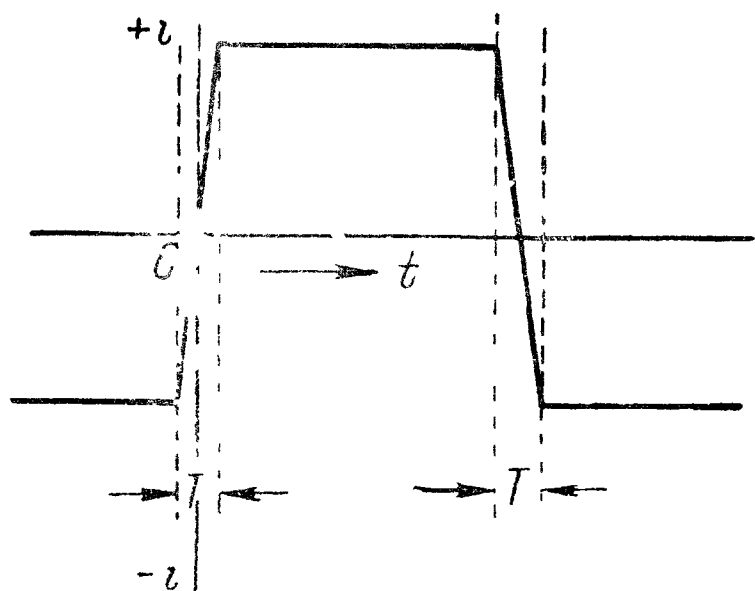
<sup>1</sup> Одновременно вихревые токи индуктируются в зубцах якоря и в полюсных башмаках. Эти токи частично глушат вызывающие их пульсации магнитного потока рассеяния, но так как зубцы якоря и полюсные башмаки делают из тонких листов, то это явление оказывает на рассматриваемый процесс генерирования вихревых токов в проводниках якорной обмотки лишь слабое влияние, которым можно пренебречь.

Если потери мощности в якорной обмотке от эл сопротивления при постоянном токе попрежнему будем обозначать через  $Q_a$ , то суммарные потери мощности в якорной обмотке можно представить следующим образом:

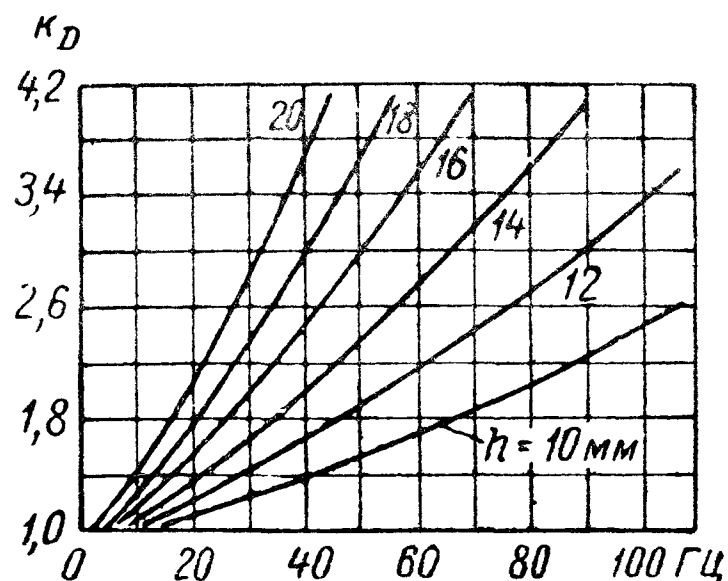
$$Q_a' = Q_a + Q_k = k_D I_a^2 R_a, \quad (527)$$

где коэффициент  $k_D$  должен учесть, насколько из-за рассматриваемого явления возрастут потери в якорной обмотке по сравнению с потерями  $Q_a$ .

Подсчет коэффициента  $k_D$  был дан впервые Дрейфусом, этот коэффициент может быть назван коэффициентом Дрейфуса, или коэффициентом увеличения потерь в якорной обмотке машин постоянного тока из-за явления коммутации. Измене-



Фиг 311 Изменение во времени тока в секции якорной обмотки



Фиг 312 Изменение значения  $k_D$  для секций якорной обмотки в зависимости от частоты для проводников разных высот  $h$

ние тока в коммутируемой секции якорной обмотки может быть принято по прямой линии, наклон которой определяется периодом коммутации  $T$  (фиг. 311). Приняв прямоугольное изменение тока и разложив прямоугольную кривую тока в тригонометрический ряд (ряд Фурье), можно вычислить потери от каждой составляющей тока, т. е. от каждой гармонической, имеющей свою частоту, кратную частоте прямоугольной кривой. Суммируя потери от отдельных гармоник тока, вводя поправки и деля на электрические потери  $Q_a$ , получаем выражение для коэффициента  $k_D$ .

Средние значения  $k_D$ , вычисленные для разных высот проводника обмотки якоря  $h$  и частот перемagnetизации, приведены по данным Треттина на фиг. 312 [Л. 18].

С ростом  $h$ , при сохранении ширины проводника  $b$ , потери в эл сопротивлении обмотки уменьшаются, а добавочные потери в обмотке возрастают. При некоторой высоте проводника  $h_0$ , называемой критической, суммарные потери в якорной обмотке будут расти, что указывает на недопустимость дальнейшего увеличения  $h$ .

Если при расчете машины постоянного тока критическая высота проводника оказывается недостаточной, то приходится делить проводник по высоте на две или три части.

Критическую высоту проводника  $h_0$  можно вычислить по следующей формуле

$$h_0 = \frac{(1,2-1,3)}{\lambda} \sqrt[3]{\frac{l_a}{l}} \sqrt[6]{2fT_N} \text{ [см]}, \quad (528)$$

где

$$\lambda = 0,14 \sqrt{f \frac{b}{m}} \quad (529)$$

учитывает отношение ширины меди во впадине к ширине впадины  $m$ ,  $l_a$  — длина полувитка якорной обмотки,  $l$  — пакетная длина железа якоря,  $f$  — частота перемагничивания,  $T_N$  — период коммутации тока одного паза (гл. VI, § 146).

Ориентировочное значение  $k_D$  можно получить, упрощая теоретическую формулу для  $k_D$  путем введения некоторых средних значений параметров, входящих в формулу.

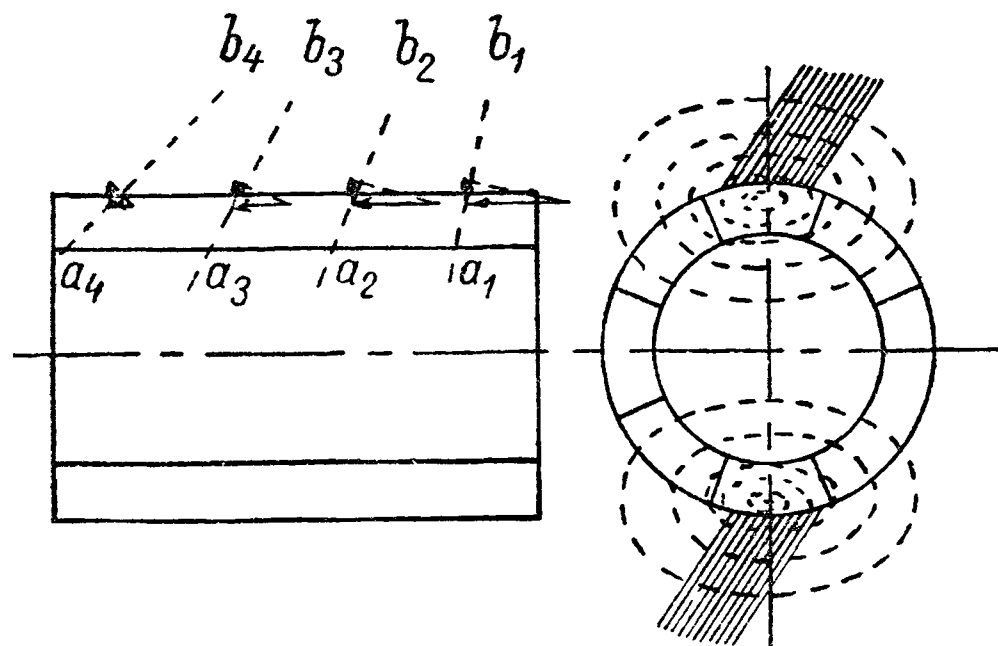
Получаем:

$$k_D = 1 + 134 \frac{l}{l_a} f \sqrt{f} h^3 \cdot 10^3. \quad (530)$$

Значения входящих сюда величин — как выше.

Эта формула дает для  $k_D$  значения, близкие к тем, которые получаются по теоретической формуле, выведенной с рядом допущений.

в) **Добавочные потери от паразитных токов в пластинах коллектора.** Эти потери получаются вследствие того, что коллекторные пластины вращаются в неподвижном пространстве, поле которого создается током, идущим через щетки (фиг. 313). Вообще говоря, потери эти незначительны; относительно больших значений достигают они в машинах для электролитических целей, которые конструируются на небольшие напряжения и очень большие токи. Коллекторы в таких машинах обычно имеют малое число пластин с большим поперечным сечением; иногда наблюдается сильный нагрев этих пластин, происходящий в значительной степени из-за упомянутых потерь.



Фиг. 313. Распространение потока, создаваемого током, идущим по пластинам коллектора.

## Г. ВЫЧИСЛЕНИЕ МАГНИТНЫХ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В МАШИНЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 229. Понятие об удельных магнитных потерях мощности в теле из ферромагнитного материала

При перемагничивании тела из ферромагнитного материала в нем выделяются потери мощности, которые превращаются в тепло. Эти потери состоят из потерь на гистерезис и потерь на вихревые токи. Как те, так и другие зависят от частоты перемагничивания и от максимальной индукции; кроме того, они зависят от формы кривой распределения в ферромагнитном материале магнитной индукции, от качества ферромагнитного материала (а именно от его электрического сопротивления) и от конфигурации тела.

Магнитные потери в ферромагнитном теле, определенные опытным путем при заранее заданных, оговоренных условиях и отнесенные либо к единице объема тела, либо к единице веса тела, называют **основными удельными магнитными потерями**, так как они определяются при исключении ряда привходящих обстоятельств; их выражают в ваттах на единицу объема тела ( $вт/дм^3$ ) или в ваттах на единицу веса тела ( $вт/кг$ ).

Если основные удельные магнитные потери определены при условиях, обусловленных в стандарте на листовую электротехническую сталь, ГОСТ 802-41, их называют **стандартными основными удельными магнитными потерями**.

Стандарт предписывает измерение основных магнитных потерь мощности при синусоидальном изменении индукции при двух ее значениях, а именно. при  $B_{\max} = 10\,000$  гс и при  $B_{\max} = 15\,000$  гс. Соответственно этому, основные удельные потери мощности в стандарте даются в  $\text{вт/кг}$  для разных марок листовой электротехнической стали и для разных толщин  $\Delta$  листов для указанных двух значений максимальной индукции. Мы будем обозначать их соответственно через  $q_{10}$  и  $q_{15}$ .<sup>1</sup> Разделяя магнитные потери мощности в ферромагнитном материале на потери мощности на гистерезис и потери мощности на вихревые токи, будем говорить об основных удельных потерях мощности на гистерезис ( $q_h$ ) и об основных удельных потерях мощности на вихревые токи ( $q_f$ ).

### 230. Основные удельные гистерезисные потери мощности

Первые исследования свойств ферромагнитных материалов были сделаны А. Г. Столетовым в 1871 г. Краткий очерк современных взглядов на природу ферромагнетизма и потерь на гистерезис дан в книге П. Л. Калантарова и Л. Р. Неймана «Теоретические основы электротехники», ГЭИ, 1951 г.

Впервые экспериментальное определение гистерезисных потерь при перемагничивании железа было произведено Штейнметцом в 90-х годах прошлого столетия. На основании ряда экспериментов Штейнметц установил, что потери на гистерезис, рассчитанные на один цикл перемагничивания и на  $1 \text{ см}^3$  железа, пропорциональны максимальной индукции  $B_m$  в степени 1,6.

$$q_h = \eta B_m^{1,6} \text{ эргов на 1 цикл и на } 1 \text{ см}^3. \quad (531)$$

Здесь коэффициент  $\eta$ , называемый гистерезисной постоянной Штейнметца, зависит только от сорта железа.

Последующими исследованиями было установлено, что практически потери мощности на гистерезис на один цикл перемагничивания не зависят от того, происходит ли перемагничивание статически, т. е. путем постепенного, медленного изменения индукции от  $+B_{\max}$  до  $-B_{\max}$ , или при помощи переменного тока определенной частоты.

Обозначая частоту перемагничивания в периодах в секунду, т. е. в герцах, через  $f$ , а максимальную индукцию через  $B_m$  в гауссах, получаем.

$$q_h = \eta B_m^{1,6} f \text{ эргов на } 1 \text{ см}^3 = \eta B_m^{1,6} f \cdot 10^{-7} \text{ ватт на } 1 \text{ см}^3$$

Умножив на  $10^3$ , получим:

$$q_h = \eta B_m^{1,6} f 10^{-4} \text{ ватт на } 1 \text{ дм}^3. \quad (532)$$

Для сортов электротехнической стали того времени (90-е годы прошлого столетия) постоянная оказалась равной

$$\eta = 16 \cdot 10^{-4}.$$

Умножив и разделив (532) на  $1000^{1,6} = 631 \cdot 10^2$ , получаем:

$$\begin{aligned} q_h &= 16 \cdot 10^{-4} \cdot \left( \frac{B_m}{1000} \right)^{1,6} \cdot 631 \cdot 10^2 \cdot f \cdot 10^{-4} = 16 \cdot 631 \times \\ &\quad \times \left( \frac{B_m}{1000} \right)^{1,6} \cdot f \cdot 10^{-6}. \end{aligned}$$

<sup>1</sup> В стандарте ГОСТ 802-41 удельные потери обозначены через  $V_{10}$  и  $V_{15}$ , что из-за общепринятого обозначения объема материала через  $V$  неудобно, поэтому мы заменяем эти обозначения на  $q_{10}$  и  $q_{15}$ , хорошо увязывающиеся с принятым нами обозначением потерь.



Так как

$$16 \cdot 631 = 10096 \approx 10^4,$$

то можем написать:

$$q_h = \frac{f}{100} \left( \frac{B_m}{1000} \right)^{1,6} [вт/дм^3]. \quad (533)$$

Эта формула справедлива для электротехнической стали с постоянной  $\eta = 16 \cdot 10^{-4}$ . Для других сортов стали с другой постоянной, например  $\eta_1$ , очевидно нужно помножить (533) на отношение  $\eta_1/\eta$ :

$$\sigma_{1h} = \frac{\eta_1}{\eta} = \frac{\eta_1}{16 \cdot 10^{-4}} \approx 631\eta_1.$$

Поэтому в окончательном виде преобразованная формула Штейнметца примет такой вид:

$$q_h = \sigma_{1h} \frac{f}{100} \left( \frac{B_m}{1000} \right)^{1,6} [вт/дм^3]. \quad (534)$$

В этом виде формула Штейнметца получила широкое распространение благодаря трудам по эл. машинам Арнольда и его учеников.

Более поздними исследованиями было установлено, что для максимальной индукции, превышающей 10 000 гс, что практически имеем в электромашиностроении, лучшее схождение с экспериментами дает формула, в которую индукция входит во второй степени. Кроме того, обычно удельные потери выражают в ваттах на 1 кг (вт/кг) и пишут их в таком виде:

$$q_h = \sigma_h \frac{f}{100} \left( \frac{B_m}{10000} \right)^2 [вт/кг], \quad (535)$$

находя значение  $\sigma_h$  опытным путем.

## 231. Основные удельные вихревые потери мощности

В обмотке якоря, как мы знаем, индуктируются э. д. с., величина и направление которых определяются по закону электромагнитной индукции. Если бы мы сделали якорь из сплошного ферромагнитного материала, то в нем также индуктировались бы по закону электромагнитной индукции э. д. с., направленные по образующим цилиндрического тела якоря. Замыкаясь через толщу сплошного якоря, указанные э. д. с. создают вихревые токи. На необходимость учета этого явления указывалось уже в середине прошлого столетия, но в практике построения эл. машин им пренебрегали вплоть до 1872 г.

Собственное поле вихревых токов стремится, согласно закону Ленца, ослабить то изменение основного магнитного поля, которое их вызывает, что сказывается в размагничивающем действии вихревых токов. Кроме того, вихревые токи вызывают тормозящее действие на вращение якоря и сопровождаются выделением тепла, которое подогревает тело якоря и уложенную на нем якорную обмотку. С точки зрения основного преобразования мощности в эл. машине, энергия, затрачиваемая на вихревые токи, является, очевидно, потерянной, поэтому говорят о потерях мощности на вихревые токи в якоре эл. машины.

Для уменьшения этих потерь мощности и размагничивающего действия вихревых токов нужно, очевидно, стремиться к возможно большему ослаблению вихревых токов. Это достигается расслоением тела якоря перпендикулярно к оси машины, т. е. в изготовлении якоря из листов электротехнической стали толщиной, как правило, равной  $\Delta = 0,5$  мм (в некоторых случаях берут  $\Delta = 0,35$  мм).

При такой небольшой толщине листов, из которых изготавливается якорь машины постоянного тока, и небольшой частоте перемагничивания (в машинах постоянного тока  $f \approx 100$  гц), можем пренебречь обратным размагничивающим действием вихревых токов на основное магнитное поле машины. Потерям же на вихревые токи пренебрегать нельзя.

На фиг. 314 представлен разрез листа из ферромагнитного материала перпендикулярно к линиям магнитной индукции, распределение которой по толщине листа  $\Delta$  принимаем равномерным. Толщина листов  $\Delta$  по сравнению с прочими размерами их очень мала, поэтому примем, что токи идут по сечению листа параллельно плоскости листов. Наибольшего значения они достигают у продольных краев листа, затем по линейному закону убывают к средней линии листа, по другую сторону которой меняют свой знак. Выделим линию тока на расстоянии  $x$  от середины листа и вычислим величину э. д. с., индуктированной в сторонах прямоугольного контура, охватываемого магнитной трубкой шириной  $dx$  и длиной  $a$ . Площадь контура

$$S_x = 2x \cdot a.$$

Поток через площадь, охватываемую магнитной трубкой, при равномерном распределении индукции  $B_m$  будет:

$$\Phi_x = S_x B_m.$$

Поэтому э. д. с. в контуре будет:

$$E_x = 4k_B \Phi_x f \cdot 10^{-8} = 4k_B B_m (2xa) f \cdot 10^{-8} \text{ в},$$

где  $k_B$  — коэффициент формы магнитного поля.

Сопротивление контура

$$r_x = \rho_0 \frac{l}{S} = \rho_0 \frac{2a}{b dx}.$$

Фиг. 314 Иллюстрация к вычислению потерь на вихревые токи.

Поэтому мощность, затрачиваемая в контуре, будет:

$$dQ = \frac{E_x^2}{r_x} = \frac{[4k_B B_m f (2xa) \cdot 10^{-8}]^2 b dx}{2a \rho_0},$$

$$dQ = \frac{32k_B^2 B_m^2 f^2 ab \cdot 10^{-16} x^2 dx}{\rho_0}.$$

Интегрируя это выражение от  $x = 0$  до  $x = \Delta/2$ , получаем:

$$Q = 32k_B^2 B_m^2 f^2 \frac{ab}{\rho_0} \frac{(\Delta/2)^3}{3} \cdot 10^{-16} = \frac{4}{3\rho_0} k_B^2 B_m^2 f^2 ab \Delta^3 \cdot 10^{-16}.$$

Разделив это на объем листа  $\Delta ab$ , имеем:

$$q_f = \frac{4}{3\rho_0} k_B^2 B_m^2 f^2 \Delta^2 \cdot 10^{-16}.$$

Здесь  $\rho_0$  — удельное эл. сопротивление металла в  $\text{ом} \cdot \text{см}^2/\text{см}$ ; вводя удельное сопротивление  $\rho$  в  $\text{ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ , имеем  $\rho_0 = \rho \cdot 10^{-4}$ , поэтому

$$q_f = \frac{4}{3\rho} k_B^2 B_m^2 f^2 \Delta^2 \cdot 10^{-12} = \frac{4}{3\rho} k_B^2 \Delta^2 \left( \frac{f}{100} \cdot \frac{B_m}{10000} \right)^2. \quad (536)$$

Так как при синусоидальной форме распределения индукции  $k_B = \frac{\pi}{2\sqrt{2}}$ , а следовательно,  $k_B^2 = \pi^2/8$ , то

$$q_f = \frac{\pi^2}{6\rho} \Delta^2 \left( \frac{f}{100} \frac{B_m}{10000} \right)^2 10^3 \text{ в ваттах на } 1 \text{ дм}^3. \quad (537)$$

Пользуясь формулой в виде (537) и относя потери к 1 кг ферромагнитного материала, имеющего плотность  $\alpha_0$  (в кг/дм<sup>3</sup>), обозначим:

$$\sigma_F = \frac{1}{\alpha_0} \cdot \frac{\pi^2}{6\rho} \Delta^2 \cdot 10^3. \quad (538)$$

Тогда

$$q_f = \sigma_F \left( \frac{f}{100} \frac{B_m}{10000} \right)^2 [\text{вт/кг}]. \quad (539)$$

### 232. Суммарные основные удельные магнитные потери мощности

Складывая формулу (535) для основных удельных потерь на гистерезис с формулой (539) для основных удельных потерь на вихревые токи, получаем формулу для суммарных основных удельных магнитных потерь (на гистерезис и на вихревые токи без учета приводящих обстоятельств):

$$q_\mu = q_h + q_f = \left[ \sigma_h \frac{f}{100} + \sigma_F \left( \frac{f}{100} \right)^2 \right] \left( \frac{B_m}{10000} \right)^2 [\text{вт/кг}] \quad (540)$$

Если сюда подставить  $f = 50$  гц, то она примет вид:

$$q_\mu = \sigma_\mu \left( \frac{B_m}{10000} \right)^2 [\text{вт/кг}], \quad (540a)$$

где

$$\sigma_\mu = \sigma_h \cdot \frac{50}{100} + \sigma_F \left( \frac{50}{100} \right)^2 = 0,5 \sigma_h + 0,25 \sigma_F. \quad (541)$$

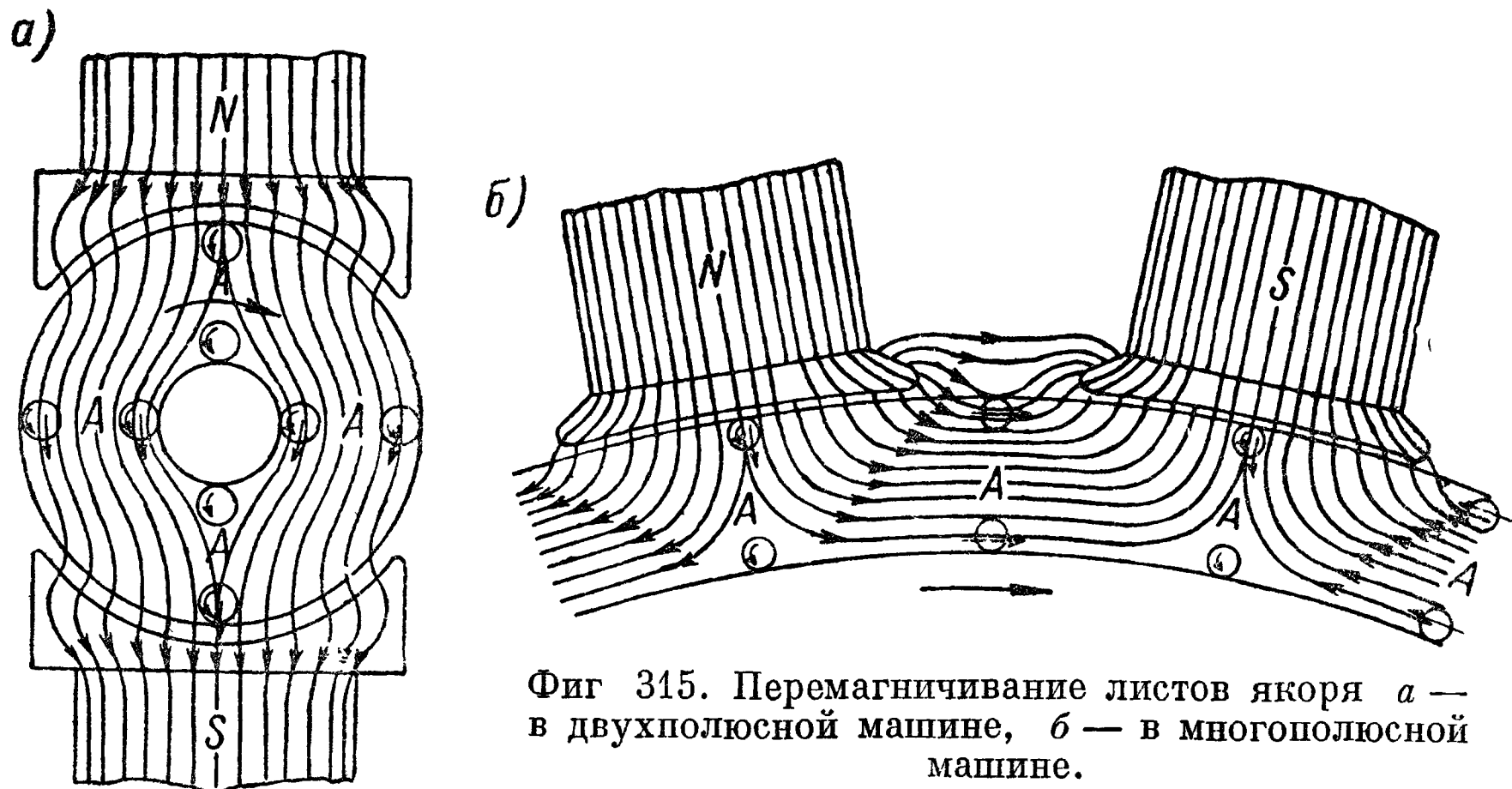
При  $B_m = 10\,000$  гс

$$q_\mu = \sigma_\mu. \quad (542)$$

Таким образом,  $\sigma_\mu$  дает величину основных удельных магнитных потерь на 1 кг ферромагнитного материала при  $B_m = 10\,000$  гс,  $f = 50$  гц и синусоидальном магнитном поле, т. е.  $q_{10}$ . При  $B_m = 15\,000$  гс из (540a) получаем  $q_{15}$ . Для разных марок листовой электротехнической стали  $q_{10}$  и  $q_{15}$  указаны в зависимости от толщины  $\Delta$  листов в ГОСТ 802-41 (табл. 2).

### 233. Гистерезисные потери мощности в якоре машины постоянного тока при вращательном перемагничивании

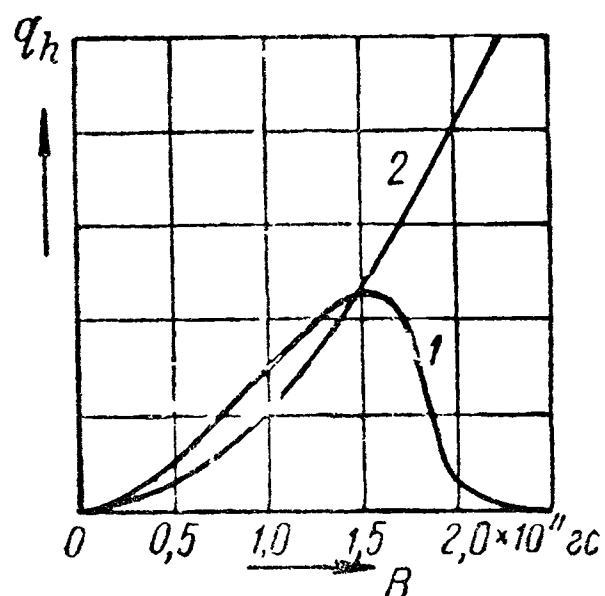
На фиг. 315, а дана вероятная картина распределения магнитного потока в гладком якоре двухполюсной, а на фиг. 315, б — в многополюсной машине постоянного тока. Сосредоточим внимание на одной молекуле ферромагнитного материала, рассматриваемой как элементарный магнит. Если бы моле-



Фиг. 315. Перемагничивание листов якоря а — в двухполюсной машине, б — в многополюсной машине.

кула была совершенно свободна, то при вращении якоря по часовой стрелке (вправо) молекула, занимая последовательно ряд указанных на фигуре положений, все время устанавливалась бы так, чтобы ее магнитный момент совпадал с направлением магнитных линий; для этого молекуле пришлось бы вращаться с частотой якоря, но в направлении, обратном направлению вращения якоря. Такому вращению, однако, будут препятствовать силы молекулярного трения. В наружных слоях якоря распределение магнитного потока более равномерно, чем внутри, вследствие чего, по мере удаления от наружной поверхности якоря к валу, число вращаемых молекул будет убывать.

Процесс перемагничивания молекул, как видим, будет происходить в иных условиях, чем при перемагничивании переменным током, например, в аппарате для определения удельных магнитных потерь. Перемагничивание, происходящее в нашем случае, можно назвать вращательным перемагничиванием, и естественно ожидать, что затрачиваемая на него мощность (потери на гистерезис) будет иная, чем при перемагничивании переменным током. Если якорь зубчатый, то в зубцах его мы получим условия, весьма близкие к перемагничиванию переменным током, в то время как в сердечнике якоря перемагничивание остается вращательным.



Фиг 316 Вероятное соотношение гистерезисных потерь при вращательном перемагничивании (1) и при перемагничивании переменным током (2)

Эксперименты, произведенные разными исследователями для сравнения потерь при вращательном перемагничивании и при перемагничивании переменным током, не дали вполне тождественных результатов, что в значительной степени объясняется трудностями подобных опытов.

Критическая оценка опубликованных данных привела к выводу, что наиболее вероятным соотношением между потерями мощности при вращательном перемагничивании и перемагничивании переменным током является представленное на фиг 316. Из фиг. 316 видим, что при вращательном перемагничивании (кривая 1) потери мощности на гистерезис сначала возрастают, достигают своего максимума, а затем быстро уменьшаются. Максимальное значение для обычной электротехнической стали получается при  $B_m = 16\,000$  гс, при  $B_m = 24\,000$  гс они сходят на нет. До  $B_m = 10\,000$  гс потери при вращательном перемагничивании больше, чем при перемагничивании переменным током (кривая 2), примерно в 1,6—2,0 раза. В сердечнике якоря индукция обычно меньше 16 000 гс, и для учета влияния вращательного перемагничивания на гистерезисные потери в сердечнике якоря, повидимому, можно ввести в формулу для потерь при перемагничивании переменным током поправочный коэффициент

$$k_h = 1,8. \quad (543)$$

В зубцах якоря, как было отмечено, мы имеем картину, аналогичную случаю перемагничивания переменным током, а потому вычисление потерь на гистерезис в зубцах якоря следует производить непосредственно по формуле (535)

#### 234. Увеличение магнитных потерь мощности в якоре машины постоянного тока вследствие механической обработки якоря при его изготовлении

Измерение магнитных потерь мощности в готовых эл. машинах показывает, что они всегда значительно больше (иногда в 2—3 раза) расчетных значений, получающихся при применении вышеприведенных формул. Это увеличение магнитных потерь мощности частично происходит от делаемых

при расчете их упрощающих допущений, но главным образом из-за тех механических операций, которым подвергается листовая электротехническая сталь, идущая на изготовление якоря.

На увеличение гистерезисных потерь мощности влияет резка листов и штамповка в них пазов для обмотки, при которых наружные края листов и края пазов закаливаются, что и повышает эти потери. Увеличение потерь на гистерезис менее значительно, чем потерь на вихревые токи. Увеличение последних происходит из-за очистки пазов от заусениц, появляющихся при штамповке и резке листов, а также от спиливания выступающих краев отдельных листов в пазах, что становится особенно ощутительным в случае плохой штамповки, сборки и прессовки дисков якоря. Избежать такой обработки, к сожалению, при теперешней технологии изготовления якоря не удастся; механическая обработка необходима для придания стенкам пазов гладкой поверхности, чтобы избежать порчи изоляции обмотки.

При обработке происходит уменьшение сечения зубцов, а следовательно, и увеличение индукций против расчетных значений и, соответственно, увеличение потерь на вихревые токи. Особенно вредно влияют на эти потери образующиеся металлические соединения отдельных листов поверх разделяющей их друг от друга изоляции. Этим создается возможность возникновения значительных токов между смежными листами, что и создает значительное возрастание потерь мощности. Из этого вытекает, что подобная обработка пазов должна производиться очень осторожно и только в той мере, в какой это вызывается действительной необходимостью.

### 235. Практический учет магнитных потерь мощности в сердечнике якоря и в зубцах якоря при холостом ходе эл. машины

Как мы видели, действительные значения магнитных потерь в сердечнике и в зубцах якоря значительно превосходят (вследствие причин, указанных в § 234) расчетные значения потерь, определенные по формулам (535) и (539). По этой причине на практике пользуются формулами, отображающими зависимость потерь от индукции и частоты перемагничивания

$$f = \frac{pn_N}{60}$$

и от объема или веса перемагничиваемого ферромагнитного материала, и вводят в них опытные поправочные коэффициенты, установленные на данном заводе рядом испытаний готовых машин. При этом сразу учитывают как гистерезисные, так и вихревые потери мощности. Пользование такими формулами дает результаты, отличающиеся от действительных магнитных потерь на  $\pm 10\%$ .

Мы приводим формулы, принятые на заводе «Электросила». Формулы учитывают увеличение магнитных потерь из-за обработки зубцов (§ 234), т. е. как основные, так и добавочные магнитные потери.

а) Суммарные магнитные потери мощности в сердечнике якоря. При частоте перемагничивания  $f$  и индукции  $B_a$  суммарные (на гистерезис и на вихревые токи) потери мощности в сердечнике якоря можно вычислять по формуле:

$$Q_{\mu a} = \sigma_{\mu a} \left( \frac{B_a}{10000} \right)^2 G_{Fe a}' [вт]. \quad (544)$$

Значения коэффициента  $\sigma_{\mu a}$  в зависимости от марки листовой стали приведены в табл. 22.

Вес материала сердечника якоря  $G_{Fe a}$  (в кг) равен его объему  $V_{Fe a}$  (в  $дм^3$ ), умноженному на плотность материала  $\gamma_{Fe} = 7,8 \text{ кг/дм}^3$ .

$$G_{Fe a} = \gamma_{Fe} V_{Fe a} = 7,8 V_{Fe a}. \quad (545)$$



Таблица 22

Коэффициенты  $\sigma_{\mu a}$  и  $\sigma_{\mu z}$  для разных марок стали

	Марки листовой электротехнической стали		
	Э1А, Э1БА, Э1ААБ	Э3А	Э4А
Значения $\sigma_{\mu a}$	$\frac{f(f+70)}{500}$	$\frac{f(f+200)}{1700}$	$\frac{f(f+220)}{2300}$
Значения $\sigma_{\mu z}$	$\frac{f(f+30)}{350}$	$\frac{f(f+100)}{1300}$	$\frac{f(f+100)}{1700}$

Если в якоре нет аксиальных вентиляционных каналов, то (в куб дециметрах)

$$V_{Fe\ a} = \frac{\pi(D_z^2 - D_i^2)}{4} l_{Fe} \cdot 10^{-6}.$$

(546 а)

При наличии вентиляционных каналов (в куб. дециметрах)

$$V_{Fe\ a} = \frac{\pi(D_z^2 - D_i^2 - \sum n_a d_a^2)}{4} l_{Fe} \cdot 10^{-6},$$

(546 б)

где  $n_a$  и  $d_a$  — число и диаметр аксиальных каналов,  $l_{Fe}$  — эффективная длина дисков якоря, все размеры — в мм.

**б) Суммарные магнитные потери мощности в зубцах якоря.** Аналогично, как и для сердечника, вычисляются суммарные магнитные потери мощности в зубцах якоря, но по среднему действительному значению индукции в зубце  $B_{z2}$  и с другими поправочными коэффициентами:

$$Q_{\mu z} = \sigma_{\mu z} \left( \frac{B_{z2}}{10000} \right)^2 G_{Fe\ z} [вт].$$

(547)

Значения  $\sigma_{\mu z}$  для разных марок листовой электротехнической стали даны в табл. 22.

В формуле (547) вес зубцов якоря  $G_{Fe\ z}$  (в кг) равен его объему  $V_{Fe\ z}$  (в  $дм^3$ ), умноженному на плотность стали  $\gamma_{Fe}$  (в  $кг/дм^3$ ):

$$G_{Fe\ z} = V_{Fe\ z} \gamma_{Fe}.$$

(548)

При прямоугольных пазах, т. е. при конических зубцах, имеем:

$$V_{Fe\ z} = Z b_{z2} h_n l_{Fe} \cdot 10^{-6},$$

(549)

где  $Z$  — число зубцов якоря,  $b_{z2}$  — средняя ширина зубца,  $h_n$  — высота зубца,  $l_{Fe}$  — эффективная длина якоря; все размеры — в мм.

При овальных или трапецевидных пазах

$$V_{Fe\ z} = \left[ \frac{\pi(D_a^2 - D_z^2)}{4} - Z h_n b_n \right] l_{Fe} \cdot 10^{-6},$$

(550)

где  $b_n$  — средняя ширина паза, остальные обозначения — как выше; все размеры — в мм.

### 236. Учет добавочных магнитных потерь мощности при нагрузке эл. машины

При нагрузке эл. машины магнитные потери мощности не остаются без изменения вследствие искажения распределения магнитного потока в зазоре эл. машины. Однако трудность расчетного определения этого увеличения побудила оценивать его совместно с добавочными потерями мощности в обмотке якоря.

### Д. УЧЕТ УКАЗАНИЙ ОСНОВНОГО ЭЛЕКТРОМАШИННОГО СТАНДАРТА ПРИ РАСЧЕТЕ К. П. Д. МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА И НЕКОТОРЫЕ ЗАВИСИМОСТИ

### 237. Стандартное подразделение потерь мощности в параллельных машинах постоянного тока

Учитывая указания основного электромашинного стандарта ГОСТ 183-41, можно подразделить потери мощности в параллельной машине постоянного тока на следующие группы:

а) **П о с т о я н н ы е** п о т е р и  $Q_0$  — не зависящие от нагрузки эл. машины при ее неизменной скорости вращения и достижении установившихся температур, к ним относятся:

- 1) механические потери,  $Q_m = Q_r + Q_R + Q_v$ ,
- 2) магнитные потери,  $Q_\mu = Q_{fa} + Q_{fz} + Q_{ha} + Q_{hz}$ ;
- 3) потери на возбуждение при холостом ходе машины,  $Q_{n0}$ ,

$$Q_0 = Q_m + Q_\mu + Q_{n0}. \quad (551)$$

б) **П о т е р и**, з а в и с я щ и е о т н а г р у з к и в п е р в о й с т е п е н и,  $Q_1$ ; к ним относятся:

- 1) переходные потери в щетках на коллекторе,  $Q_B$ ,
- 2) изменение потерь в цепи параллельной обмотки возбуждения по сравнению со значением  $Q_0$  при регулировании машины на постоянное напряжение на зажимах (пропорциональность изменения не является строгой, но отступления незначительны)  $Q_{n1}$ ,

$$Q_1 = Q_B + Q_{n1}. \quad (552)$$

в) **П о т е р и**, з а в и с я щ и е о т к в а д р а т а т о к а н а г р у з к и при неизменном напряжении на зажимах машины,  $Q_2$ ; к ним относятся:

- 1) потери в электрических сопротивлениях обмотки якоря и в последовательно с ней соединенных обмотках,  $Q_a + Q_s + Q_w + Q_c$ ;
- 2) добавочные потери,  $Q_d$ .

$$Q_2 = Q_a + Q_s + Q_w + Q_c + Q_d. \quad (553)$$

Таким образом, для параллельной машины постоянного тока можно написать:

$$Q_\Sigma = Q_0 + Q_1 + Q_2. \quad (554)$$

### 238. Вычисление к. п. д. машины постоянного тока при частичных нагрузках

Воспользовавшись формулой (481а), получаем:

$$\eta_g = \frac{P_2}{P_2 + Q_\Sigma} = \frac{1}{1 + \frac{Q_\Sigma}{P_2}} = \frac{1}{1 + \frac{Q_0 + Q_1 + Q_2}{P_2}}. \quad (555)$$

При неизменном напряжении параллельного генератора частичная нагрузка его равна  $P_2 - \frac{I_a}{I_{aN}} = P_2 x$ , где  $x = \frac{I_a}{I_{aN}}$ , а три составляющие потерь энергии при частичной нагрузке напишутся так:  $Q_0$ ,  $Q_1 x$ ,  $Q_2 x^2$ , тогда подставляя эти значения в (555), получим:

$$\eta_g = \frac{1}{1 + \frac{Q_0}{P_2 x} + \frac{Q_1 x}{P_2 x} + \frac{Q_2 x^2}{P_2 x}} = \frac{1}{1 + \frac{Q_0}{P_2 x} + \frac{Q_1}{P_2} + \frac{Q_2 x}{P_2}} \quad (556)$$

Умножив числитель и знаменатель (556) на 100 и обозначив

$$\frac{Q_0}{P_2} 100 = p_0; \quad \frac{Q_1}{P_2} 100 = p_1, \quad \frac{Q_2}{P_2} 100 = p_2, \quad (557)$$

получим:

$$\eta_g = \frac{100}{100 + \frac{p_0}{x} + p_1 + p_2 x} \% = \frac{100}{100 + \sum} \% \quad (558)$$

где  $p_0$ ,  $p_1$  и  $p_2$  представляют значения потерь в процентах от полезной мощности, а  $\sum = \frac{p_0}{x} + p_1 + p_2 x$ .

Приведем пример вычисления к. п. д. параллельного генератора постоянного тока (табл. 23 и 24).

Аналогичные вычисления можно сделать и для параллельного электродвигателя постоянного тока, внося в расчет соответствующие изменения.

### 239. Вычисление нагрузки, при которой к. п. д. машины постоянного тока достигает своего наибольшего значения

Возьмем опять генераторный режим работы машины постоянного тока и воспользуемся формулой (481в):

$$\eta_g = 1 - \frac{Q_\Sigma}{P_2 + Q_\Sigma}.$$

Заменим здесь  $P_2$  через  $UI_a$  и, взяв производную от  $\eta_g$  по  $I_a$ , приравняем ее нулю:

$$\eta_g = 1 - \frac{Q_\Sigma}{UI_a + Q_\Sigma},$$

$$\frac{d\eta_g}{dI_a} = - \frac{(UI_a + Q_\Sigma) \frac{dQ_\Sigma}{dI_a} - Q_\Sigma \left( U + \frac{dQ_\Sigma}{dI_a} \right)}{(UI_a + Q_\Sigma)^2} = 0$$

Тогда

$$(UI_a + Q_\Sigma) \frac{dQ_\Sigma}{dI_a} = Q_\Sigma \left( U + \frac{dQ_\Sigma}{dI_a} \right),$$

или

$$I_a \frac{dQ_\Sigma}{dI_a} = Q_\Sigma.$$

Подставляя сюда (554), получаем

$$\begin{aligned} I_a (C_1 + 2C_2 I_a) &= Q_0 + C_1 I_a + C_2 I_a^2, \\ C_1 I_a + 2C_2 I_a^2 &= Q_0 + C_1 I_a + C_2 I_a^2, \\ Q_0 &= C_2 I_a^2 = Q_2, \end{aligned} \quad (559)$$

Таблица 23

Вычисление к. п. д.  $\eta_{gN}$  параллельного генератора постоянного тока со следующими номинальным данными:  $P_N=2000$  квт;  $U_N=500$  в;  $I_{aN}=4000$  а;  $n_N=500$  об/мин.

№ п/п	Название потерь мощности	Обозначение потерь мощности	Значение потерь мощности, квт	В процентах от номинальной мощности, %
1	Магнитные потери мощности . . . . .	$Q_\mu$	30	1,5
2	Потери мощности на трение щеток о коллектор . . . . .	$Q_r$	10	0,5
3	Потери мощности на трение в подшипниках и на вентиляцию . . . . .	$Q_R + Q_V$	25	1,25
4	Потери мощности в параллельной обмотке возбуждения при холостом ходе	$Q_{n0}$	6	0,3
	Постоянные потери мощности . . . . .	$Q_0$	71	3,55
5	Переходные потери мощности в щетках на коллекторе . . . . .	$Q_B$	8	0,4
6	Увеличение потерь мощности в параллельной обмотке возбуждения . . . . .	$Q_{n1}$	—	—
	Потери мощности, пропорциональные первой степени нагрузки . . . . .	$Q_1$	8	0,4
7	Потери мощности в обмотке якоря . . . . .	$Q_a$	20	1,00
8	Потери мощности в последовательной обмотке возбуждения . . . . .	$Q_s$	—	—
9	Потери мощности в обмотке добавочных полюсов . . . . .	$Q_w$	4	0,2
10	Потери мощности в компенсационной обмотке . . . . .	$Q_c$	10	0,5
11	Добавочные потери мощности . . . . .	$Q_d$	9	0,45
	Потери мощности, пропорциональные второй степени нагрузки . . . . .	$Q_2$	43	2,45
	Сумма всех потерь мощности . . . . .	$Q_\Sigma$	122	6,4
	Затраченная мощность . . . . .	$P_1$	2122	106,4
	К п д. генератора по формуле (481 в) в процентах от затраченной мощности $P_1$ . . . . .	$\eta_g$	—	94,3

Таблица 24

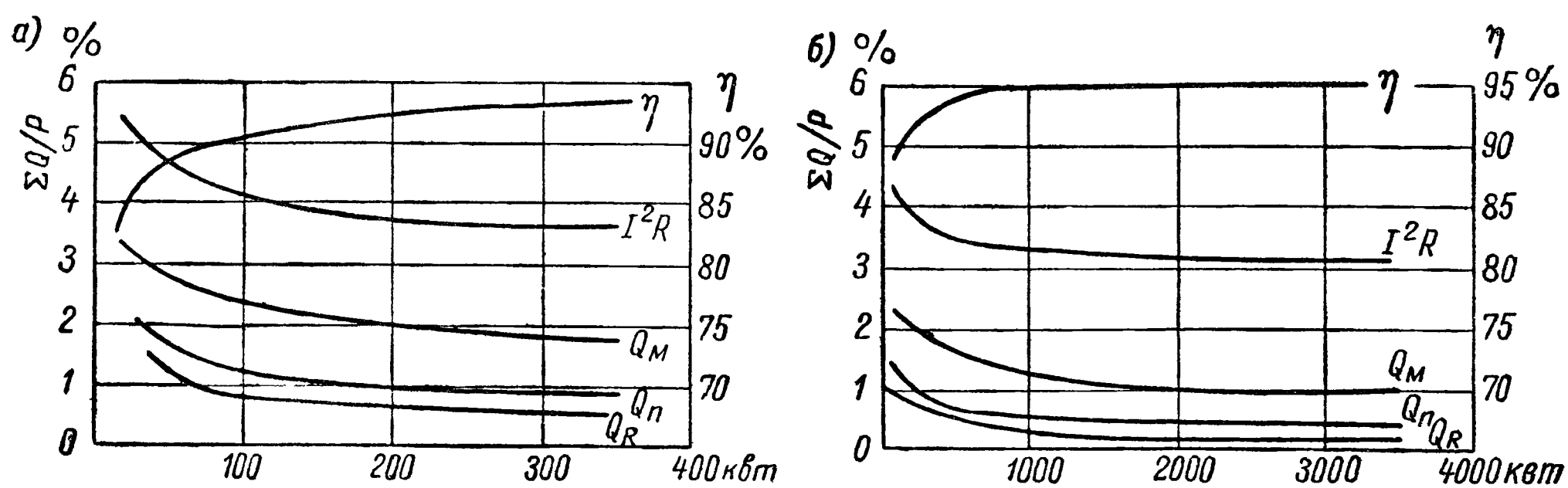
Вычисление  $\eta_{gN}$  при частичных нагрузках в долях ( $x$ ) номинальной нагрузки генератора постоянного тока, указанного в табл. 23; расчет по формуле (558)

	Доля номинальной нагрузки $x$				
	1/4	2/4	3/4	4/4	6/4
$\frac{P_0}{x}$	14,2	7,1	4,74	3,55	2,37
$P_1$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
$P_2 x$	0,535	1,075	1,615	2,45	3,23
$\Sigma$	15,135	8,575	6,755	6,40	6,001
$100 + \Sigma$	115,135	108,575	106,755	106,4	106,00
$\eta_{gx}$	86,9	92,0	93,8	94,3	94,5

т. е. при неизменном напряжении машины ( $U = \text{const}$ )  $\eta_g$  достигает своего наибольшего значения при значении тока якоря, при котором постоянные потери ( $Q_0$ ) становятся равными потерям, пропорциональным квадрату тока ( $Q_2 = C_2 I_a^2$ ).

#### 240. Зависимость к. п. д. машины постоянного тока от величины номинальной мощности

Интерес представляет номинальное значение  $\eta_N$  в зависимости от величины мощности машины постоянного тока, в предположении обычного исполнения машины, обычного использования материалов и обычных окружных скоростей вращения. Для этих условий удастся построить зависимости по-



Фиг. 317. Потери мощности в машинах постоянного тока

терь и к. п. д. от мощности машины постоянного тока и дать процентные значения потерь мощности, пропорциональных  $I_a^2 \Sigma R$ , магнитных потерь  $Q_\mu$ , потерь на параллельное возбуждение  $Q_n$ , потерь на трение  $Q_R$ . Эти зависимости построены на фиг. 317 по данным Треттина. Складывая по точкам эти кривые и прибавляя соответствующие средние значения потерь на трение щеток  $Q_r$  и в переходном слое щеток на коллекторе, можно построить кривые  $\eta_N$ , нанесенные на фиг. 317 в зависимости от номинальной мощности.

При расчете потерь принята окружная скорость якоря  $v_a \approx 20$  м/сек, соответствующая частоте, примерно, 20—25 гц. Номинальные напряжения машин приняты

$$U_N = 230 \text{ в до номинальной мощности } P_N = 100 \text{ кВт,}$$

$$U_N = 440 \text{ в до номинальной мощности } P_N = 500 \text{ кВт,}$$

$$U_N = 600 \text{ в для больших мощностей.}$$

#### Е. ОПЫТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ К. П. Д. МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

##### 241. Вводное замечание

Общие указания основного стандарта на эл. машины ГОСТ 183-41 касательно опытного определения к. п. д.  $\eta$  приведены в § 218.

Методы опытного определения  $\eta$  распадаются на две группы:

- 1) методы непосредственного определения  $\eta$ ;
- 2) методы косвенного определения  $\eta$ .

Общим неизменным условием для применения всех методов опытного определения  $\eta$  является приработавшееся состояние подшипников, коллектора и коллекторных щеток, отсутствие вибраций, препятствующих нормаль-



ной работе отдельных узлов машины, отсутствие ненормальных шумов, в особенности периодических, и т. п. неисправностей

Более подробно методы опытного определения  $\eta$  изложены в следующих книгах:

Л. М. П и о т р о в с к и й и Е. А. П а л ь, Испытание электрических машин, ч. I, Общая часть и испытание машин постоянного тока, ГЭИ, 1949 г.

Г. К. Ж е р в е, Промышленные испытания электрических машин, ГЭИ, 1950 г.

## 242. Прямые методы опытного определения к. п. д. эл. машины

Сущность этих методов сводится к измерению полезной мощности  $P_2$ , затрачиваемой мощности  $P_1$  и к вычислению их отношения:  $\eta = \frac{P_2}{P_1}$ .

Применение прямых методов допустимо тогда, когда разница между затрачиваемой (подводимой) и полезной мощностью получается такого порядка, что ошибка в измерениях мощностей может лишь незначительно сказаться на результате вычисления  $\eta$ . В зависимости от разновидности прямого метода опытного определения (см. ниже) это имеет место тогда, когда ожидаемое значение в одних случаях не более 80%, в других случаях — не более 90% (см. ниже).

Если метод опытного определения  $\eta$  не оговорен в технических условиях заказа эл. машины, то стандарт рекомендует применение непосредственного опытного определения  $\eta$ , если ожидаемое значение  $\eta$  не более 50%, иными словами, лишь к очень маленьким эл. машинам; из этого можно сделать заключение (в стандарте не содержится), что стандарт отдает явное предпочтение косвенным методам опытного определения  $\eta$ .

**а) Прямой метод по измерениям мощностей (метод двигателя-генератора).** Затрачиваемая (подводимая) и полезная мощность измеряются эл. измерительными приборами. Вследствие большей точности электрических измерений по сравнению с измерениями механической мощности, метод, согласно указанию стандарта, можно применять, если ожидаемое значение  $\eta$  доходит до 90%.

На практике этот метод применяется тогда, когда нужно определить общий к. п. д.  $\eta_a$  агрегата из электромашиного генератора и электродвигателя. В этом случае  $\eta_a$  равняется отношению полезной мощности  $P_{2g}$ , отдаваемой генератором и измеряемой электроизмерительными приборами, к эл. мощности  $P_{1d}$ , подводимой к электродвигателю и также измеряемой электроизмерительными приборами:  $\eta_a = P_{2g}/P_{1d}$ .

Принципиально метод можно применить и для определения  $\eta$  каждой из эл. машин, составляющих агрегат, если они совершенно тождественны. Для этой цели метод был предложен в свое время Лафонтеном и в дальнейшем получил ряд уточнений. Однако ныне на практике для определения к. п. д. отдельных эл. машин постоянного тока он не применяется и заменяется одним из следующих прямых методов.

**б) Прямой метод по торможению — метод торможения.** В основном этот метод применяется для непосредственного опытного определения  $\eta$  электродвигателей. Полезная (отдаваемая) механическая мощность  $P_2$  измеряется динамометром (электрическим, механическим или гидравлическим тормозом) и пересчитывается в единицы эл. мощности, а подводимая (затрачиваемая) эл. мощность измеряется электроизмерительными приборами. Так как измерение полезной мощности динамометром менее точно, чем измерение электроизмерительными приборами, то этот метод стандарт рекомендует лишь в случае, когда ожидаемое значение  $\eta$  не более 80%.

Метод можно применить и для непосредственного определения  $\eta$  небольших генераторов, при этом машина должна вращаться в качестве двигателя.

Для того чтобы при вращении машины двигателем получились такие же потери, как в генераторном режиме, необходимо, чтобы машина вращалась в сторону, обратную той, в какую она вращалась генератором. При соблюдении этого условия реакция якоря будет в обоих случаях одинаковой; это особенно важно, если машина не имеет добавочных полюсов и щетки для безискровой коммутации сдвинуты с геометрической магнитной нейтрали. Напряжение, подводимое к якорю машины при вращении двигателем при номинальном токе якоря и при номинальном токе возбуждения, должно быть таково, чтобы скорость ее вращения (обороты в минуту) была номинальной, для этого напряжение, подводимое к якорю, должно быть больше номинального на сумму падений напряжения в якоре и в контакте щеток. Таким образом, требуется наличие источника постоянного тока с регулируемым напряжением — осложнение, из-за которого рассматриваемый метод к генераторам на практике не применяется.

**в) Прямой метод по измерению нагрузки — метод нагрузки.** В стандарте сказано, что отдаваемая (полезная) мощность измеряется тарированной эл. машиной, которую вращает испытуемая машина, а подводимая (затрачиваемая) мощность измеряется электроизмерительными приборами. Из этого следует, что стандарт рекомендует этот метод только для электродвигателей. По существу метод нагрузки отличается от ранее рассмотренного метода торможения только тем, что в нем динамометр заменен эл. машиной, к. п. д. которой заранее определен (тарированная машина) или может быть определен при производстве испытания. По этой причине применимость этого метода, как и метода торможения, рекомендуется стандартом только для случаев, когда ожидаемое значение  $\eta$  не более 80%.

По существу метод нагрузки можно применить и для определения  $\eta$  генератора постоянного тока, если полезную мощность испытуемого генератора измерять электроизмерительными приборами, а подводимую (затрачиваемую) мощность измерять тарированным электродвигателем. В качестве такового целесообразно пользоваться параллельным двигателем постоянного тока.

### 243. Косвенные методы опытного определения к. п. д. машины постоянного тока

Косвенными методами опытного определения к. п. д. эл. машины называют такие методы, в которых к. п. д. вычисляется как отношение полезной мощности к сумме, состоящей из полезной мощности и потерь машины. Последние определяются либо опытным путем суммарно — **косвенные методы по сумме потерь**, — либо частично опытным путем, частично вычислением по опытным данным, а частично учитываются по опытным данным — **косвенные методы по отдельным потерям**.

**а) Косвенные методы по сумме потерь, или суммарный косвенный метод.** Из этих методов применительно к машине постоянного тока находит себе применение только метод возвратной работы, иногда называемый методом взаимной работы, осуществляемый в трех вариантах. Этот метод требует установившихся температур обмоток и подшипников, если последние скользящего трения.<sup>1</sup> При разных температурах окружающего воздуха в пределах до  $+35^{\circ}\text{C}$  (предельная допускаемая по ГОСТ 183-41 температура для окружающей среды)<sup>2</sup> установившиеся температуры обмоток и подшипников скольжения будут несколько различными, а следовательно, будут разниться и указанные потери.

<sup>1</sup> Потери в подшипниках качения практически от температуры не зависят.

<sup>2</sup> Для машин, предназначенных для электрооборудования кораблей (корабельные машины), за предельную допустимую температуру окружающего воздуха принимается  $+40^{\circ}\text{C}$ .

Поэтому при применении метода возвратной работы необходимо записывать температуру окружающей среды и стремиться к тому, чтобы испытание производилось при температуре окружающей среды, лежащей между  $+10^\circ$  и  $+25^\circ\text{C}$ . Стандарт рекомендует приводить эл. сопротивление обмоток к температуре  $+75^\circ\text{C}$ , но в таком случае опыт настолько осложняется, что целесообразнее применить косвенные методы определения к п. д. по отдельным потерям.

Стандарт дает следующее определение метода возвратной работы:

«Этот метод состоит в том, что две совершенно одинаковых эл. машины (т. е. машины одинакового типа с одинаковыми номинальными данными) соединяют механически и электрически таким образом, чтобы они работали друг на друга, при этом одна — в режиме генератора, а другая — в режиме двигателя. Токи возбуждения машин должны быть установлены таким образом, чтобы при номинальной скорости вращения машин были выполнены следующие условия

а) среднее значение токов якорей обеих машин должно равняться их номинальному току,

в) напряжение якорных цепей, в зависимости от того, предназначаются ли испытуемые машины для работы в качестве генераторов или в качестве двигателей, должно быть на величину падения напряжения в якоре больше или меньше номинального напряжения испытуемых машин

**Примечание.** Под якорной цепью подразумевается каждая из двух параллельных цепей, содержащих якоря испытуемых машин

Мощность, потребная для покрытия потерь испытуемых машин, может доставляться либо электрически, либо механически, либо частью электрически, частью механически. Эту извне доставляемую для покрытия потерь мощность нужно при вычислении к п. д. распределить надлежащим образом между обеими машинами»

Мы рассмотрим только две разновидности метода 1) с покрытием потерь электрически, т. е. с питанием от эл. сети, и 2) с покрытием потерь механически (тарированным электродвигателем).

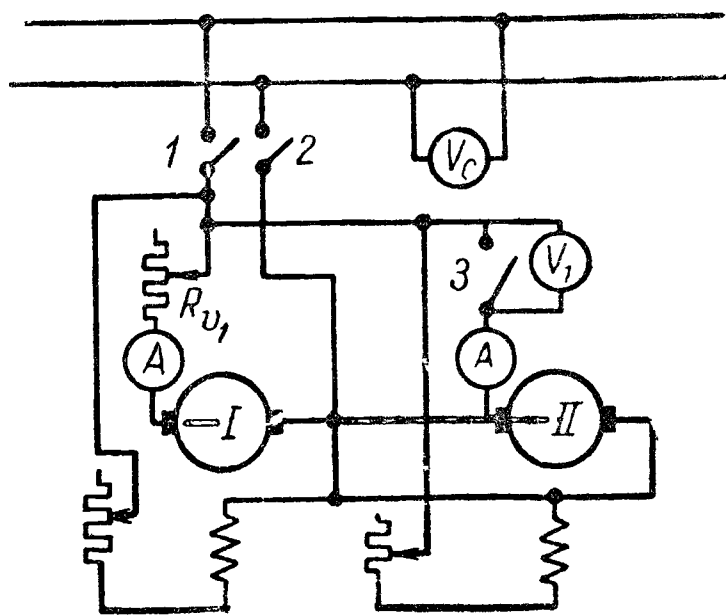
**б) Метод возвратной работы с добавочным питанием от эл. сети.** Схема включения двух параллельных машин постоянного тока для производства этого испытания представлена на фиг. 318. Первоначально пускают машину *I* от сети в качестве двигателя с номинальной скоростью вращения, замкнув рубильники 1 и 2. При разомкнутом рубильнике 3 возбуждают машину *II* в качестве генератора до напряжения сети, после замыкания накоротко пускового реостата  $R_{v1}$  в цепи машины *I* и после того, как установлено, что вольтметр  $V_1$  показывает на зажимах рубильника 3 разность напряжений обеих машин, а не сумму. Замыкают затем рубильник 3. Токи  $I_{a1}$  и  $I_{a2}$  устанавливают посредством регулирования токов  $i_1$  и  $i_2$  в независимо приключенных к сети обмотках возбуждения обеих машин таким образом, чтобы полусумма токов  $I_{a1}$  и  $I_{a2}$  равнялась номинальному значению тока  $I_{aN}$ .

$$I_{aN} = \frac{I_{a1} + I_{a2}}{2}. \quad (560)$$

Если машины предназначаются для генераторной работы, то сумма магнитных потерь обеих машин в схеме возвратной работы должна быть равна магнитным потерям при номинальном генераторном режиме, поэтому на вольтметре  $V_c$  мы должны иметь напряжение:

$$U_c' = U_N + I_a R_a + 2\Delta U, \quad (561)$$

где  $R_a$  — сопротивление обмотки якоря, а  $2\Delta U$  — падение в контакте щеток.



Фиг. 318. Схема эл. соединений при методе возвратной работы с добавочным питанием от сети.

Если машины предназначены для двигательной работы, то должно выполняться равенство:

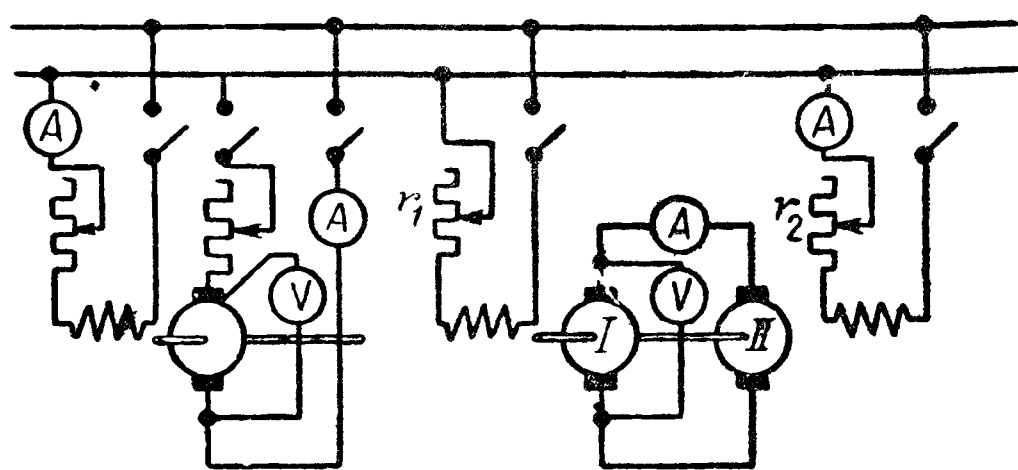
$$U_c = U_N - (I_a R_a + 2\Delta U) \quad (562)$$

Потери на возбуждение не измеряются, а учитываются как произведение  $U_N$  на номинальное значение тока возбуждения  $i_N$ , которое необходимо при номинальной нагрузке машины в качестве генератора либо в качестве двигателя, в зависимости от того, для какой работы предназначены обе машины; это значение  $i_N$  должно быть установлено соответствующим опытом.

Предполагая, что обе машины имеют одинаковые значения  $\eta_N$ , можем написать:

$$\eta_N = \frac{2P_N}{2(P_N + U_N i_N) + U_c I_N}, \quad (563)$$

где  $U_c$  — напряжение сети, а  $I_c$  — ток, поступающий из сети.



Фиг. 319 Схема эл. соединений при методе возвратной работы с добавочным механическим покрытием потерь

Из вышесказанного вытекает, что напряжение  $U_c$  должно быть легко регулируемым, в этом недостаток данной разновидности метода возвратной работы.

Та же схема фиг. 318 годится и для испытания независимо возбуждаемых генераторов постоянного тока, с заменой потерь на возбуждение  $U_N i_N$  через  $u i_N$ , где  $u$  — напряжение источника независимого возбуждения

**в) Метод возвратной работы с добавочным механическим покрытием потерь.** В этом случае схема эл. соединений для испытания двух параллельных машин постоянного тока приведена на фиг. 319. Здесь вспомогательный двигатель и обе испытуемые машины жестко механически соединены друг с другом. Мощность, доставляемая для добавочного покрытия потерь испытуемых машин, определяется по мощности, потребляемой из сети вспомогательным двигателем и по заранее определенному к. п. д. независимо возбуждаемого вспомогательного двигателя постоянного тока без учета его потерь на возбуждение.

Испытуемым машинам целесообразно дать независимое возбуждение. Посредством реостатов  $r_1$  и  $r_2$  устанавливают в цепи якорей испытуемых машин номинальный ток  $I_{aN}$ , а напряжение  $U$  на зажимах испытуемых машин берут по (561) или по (562) в зависимости от того, определяем ли  $\eta$  для генераторного или для двигательного режима работы испытуемых машин

К. п. д. в рассматриваемом опыте можем написать так.

$$\eta = \frac{2P_N}{2(P_N + U_N i_N) + U_c I_c \eta_d}, \quad (564)$$

где  $U_c$  — напряжение сети, питающей тарированный двигатель,  $I_c$  — ток, потребляемый тарированным двигателем,  $\eta_d$  — к. п. д. тарированного двигателя, определенный без учета потерь на его возбуждение.

О применении метода возвратной работы к определению  $\eta$  последовательных машин постоянного тока см. книги по тяговым двигателям постоянного тока.

**г) Косвенный метод по отдельным потерям.** При вычислении к. п. д. машины постоянного тока по этому методу подлежат учету все потери в машине, а именно: 1) магнитные потери при холостом ходе машины, 2) механи-



ческие потери — потери на трение в подшипниках, потери на вентиляцию и потери на трение щеток, 3) основные потери в обмотке якоря и во всех обмотках, последовательно с ней включенных, 4) потери на возбуждение, 5) потери в переходном слое щеток на коллекторе, 6) добавочные потери — к ним относятся потери, не учтенные в вышеуказанных.

Перечисленные потери можно разбить на две группы: постоянные потери, т. е. потери, не зависящие при неизменной скорости вращения машины от ее нагрузки, и на переменные, или нагрузочные, потери, т. е. потери, зависящие от нагрузки машины.

К постоянным потерям относятся магнитные потери при холостом ходе машины и механические потери при номинальной скорости вращения, их определяют при холостом ходе двигателем или при холостом ходе генератором и обычно называют потерями холостого хода; правильнее называть их холостыми потерями, так как речь идет не о всех потерях, имеющих при холостом ходе машины, а потерях холостого хода без учета потерь на возбуждение, которые относятся к переменным потерям.

К переменным потерям относятся все прочие из вышеперечисленных потерь (пп. 3—6). Они распадаются на две подгруппы; первая из них состоит из потерь в обмотках (в якорной обмотке и в обмотках, последовательно с ней соединенных, и потерь в параллельной возбуждающей обмотке), ко второй — потери в переходном слое щеток на коллекторе и добавочные потери. Первая подгруппа переменных потерь вычисляется следующим образом: в обмотках якорной и последовательно с ней соединенных (последовательной возбуждающей, добавочных полюсов и компенсационной, если они имеются), они вычисляются по квадратам токов в обмотках и их эл. сопротивлениям, приведенным к  $75^\circ \text{C}$  (включая и сопротивления соединительных шин); потери в параллельной возбуждающей обмотке вычисляются по напряжению на ее зажимах и по току в ней. Вторая подгруппа переменных потерь учитывается, как указывалось выше, условно. Потери в переходном слое щеток на коллекторе принимаются пропорциональными произведению тока якоря на падение напряжения в переходном слое щеток.

Добавочные потери в машине постоянного тока условно принимаются равными 1% от полезной мощности — в случае генератора и от затрачиваемой мощности — в случае двигателя

Определяя потери холостого хода испытуемой машины (точнее, холостые потери) в режиме двигателя, нужно к его зажимам подводить напряжение  $U$ , равное номинальному напряжению  $U_N$ , увеличенному или уменьшенному на падение напряжения в якоре, в зависимости от того, для какого режима работы предназначается испытуемая машина.

При пуске машины двигателем для измерения ее холостых потерь подведенная к якору мощность будет тратиться на холостые потери ( $Q_m + Q_\mu$ ) и на потери в якоре от тока  $I_0$ , поэтому, строго говоря, холостые потери будут равны:

$$Q_m + Q_\mu = UI_0 - (I_0^2 R_\Sigma + 2\Delta UI_0). \quad (565)$$

При больших и средних машинах можно принимать, вследствие незначительности поправки.

$$Q_m + Q_\mu \approx UI_0,$$

где  $U$ , как было указано, берется по формуле (561) или по (562) в зависимости от того, предназначается ли испытуемая машина для генераторной или для двигательной работы. Холостые потери испытуемой машины будут, очевидно, равны мощности, потребляемой цепью якоря тарированного двигателя, умноженной на к. п. д. тарированного двигателя, определенный без учета его потерь на возбуждение.



Если мощность вспомогательного параллельного двигателя постоянного тока такова, что, при вращении испытуемой машины для определения ее холостых потерь, он нагружался почти полностью, то можно считать, что разность между мощностью  $P''$ , потребляемой вспомогательным двигателем при вращении им испытуемой машины, возбужденной вышеуказанным образом, и мощностью  $P'$ , расходуемой на собственное вращение при отсоединении испытуемой машины, будет равна холостым потерям испытуемой машины:

$$P = P'' - P' = Q_m + Q_\mu. \quad (566)$$

Этим значительно упрощается опыт определения холостых потерь без заметного ущерба для точности, чем нередко пользуются на практике.

Сравнивая методы определения холостых потерь испытуемой машины при работе ее в режиме двигателя и в режиме генератора, видим, что в первом случае нужно иметь регулируемое напряжение для питания испытуемой машины, во втором случае нужно иметь вспомогательный двигатель либо подходящей мощности, либо заранее тарированный

---

---

---

## ГЛАВА XI

### ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В МАШИНАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

#### А. ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

##### 244. Определение некоторых понятий

Согласно ГОСТ 183-41, для эл. машин, работающих с естественной вентиляцией или с открытым циклом принудительной вентиляции, за предельную допускаемую температуру окружающего воздуха принимается температура  $+35^{\circ}\text{C}$ . Та же предельная температура для охлаждающей газовой среды (воздух или водород) допускается и для эл. машин, работающих с замкнутым циклом принудительной вентиляции. Исключение составляют синхронные турбогенераторы и все эл. машины судового электрооборудования, — для них за предельную допускаемую температуру окружающего воздуха, а также охлаждающей газовой среды принимается температура  $+40^{\circ}\text{C}$ . При этом по ГОСТ 183-41 предполагается, что высота места установки эл. машины над уровнем моря не превышает 1000 м. При больших высотах нужно учитывать разрежение воздуха, вследствие чего необходимо понизить номинальную мощность эл. машины.

Если температуры отдельных частей эл. машины одинаковы с температурой окружающего воздуха с точностью до  $\pm 3^{\circ}\text{C}$ , то такое состояние эл. машины считается практически холодным, если же они отличаются от температуры окружающего воздуха более чем на  $+3^{\circ}\text{C}$ , то такое состояние называется нагретым.

Рабочей температурой отдельной части эл. машины называется практически установившаяся температура этой части при неизменной температуре окружающего воздуха (или охлаждающей среды) при продолжительной неизменной номинальной нагрузке. При этом практически установившейся температурой считается температура какой-либо части эл. машины в том случае, если изменение ее в течение часа не превышает  $1^{\circ}\text{C}$  при условии, что нагрузка эл. машины и температура охлаждающего воздуха (или охлаждающей среды) остаются неизменными.

За условную рабочую температуру принимается температура в  $75^{\circ}\text{C}$ ; к ней приводят температуры всех обмоток эл. машины при вычислении потерь мощности в их эл. сопротивлениях (омические потери)

Превышением температуры отдельной части эл. машины называется разность между температурой этой части и температурой охлаждающей ее среды, газовой или жидкой; в случае машины постоянного тока такой средой, как правило, является воздух.

##### 245. Методы измерения температур при испытании эл. машин

Измерение температур наружных неподвижных частей эл. машин производится термометром либо в виде ртутного или спиртового термометра (прикладываемых бульбой к тому месту, где желательно произвести измерение

температуры), либо в виде термопары, также прикладываемой к соответствующему месту обмотки. Практически чаще всего пользуются ртутным термометром с делениями шкалы на градусы, а в ответственных измерениях — с делениями через  $0,1^{\circ}\text{C}$ . Спиртовой термометр приходится применять тогда, когда измерение нужно произвести в месте, в котором имеются пульсирующие магнитные поля; они могут вызвать в ртутном термометре дополнительно нагревание столбика ртути и тем исказить результат измерения.

Необходимости в применении спиртового термометра при испытании машин постоянного тока не возникает, так как измерение температуры обмотки якоря можно произвести только при остановленном якоре и выключении тока, а в прочих обмотках, в которых измерение температуры возможно при вращении машины, нет пульсаций магнитных полей в стационарном режиме работы.

К термопарам прибегают тогда, когда производят подробное исследование температур во многих точках, обычно при типовых испытаниях эл. машин, и требуется всесторонне обследовать тепловое состояние машины; тогда нужно по возможности одновременно произвести большое число измерений температур при наличии небольшого персонала. В таких случаях пользуются ящиками на большое число термопар, присоединенных к переключательному устройству с общим измерителем-гальванометром, что позволяет быстро и надежно производить измерения.

Для измерения температур электромашинных обмоток применяют, кроме того, два других метода: метод сопротивления и метод заложенных температурных детекторов (для якорных обмоток): для последнего используются либо термопары, либо элементы сопротивления определенного, стандартного образца (длиной в 50 см). Достоинством термопары является то, что она дает действительно температуру той точки, в которой заложена, в то время как элемент сопротивления, вследствие указанной своей протяженности, дает некоторое среднее значение температуры по длине соприкосновения элемента с обмоткой. Недостатком термопары (почему ее применяют реже, чем элемент сопротивления) является трудность такой ее закладки в пазы машины (одновременно с закладкой якорной обмотки), чтобы не оборвать тонких выводных соединений термопары, что, к сожалению, трудно выполнимо. Выводы от элементов сопротивления удастся делать из полосок меди более прочных.

Указанные три метода измерения температуры в применении к электромашинной обмотке принципиально различны. Метод термометра дает температуру наружного слоя обмотки, в то время как для суждения о безопасности температурного состояния обмотки важно знать температуру наиболее горячей ее точки, в которой происходит усиленное старение изоляции. Температура наиболее горячей точки обычно выше на  $10\text{—}15^{\circ}\text{C}$  температуры наружной поверхности обмотки, измеренной термометром.

Измерение температуры обмотки по увеличению ее сопротивления дает среднее значение для всей обмотки, измеренная по этому методу температура обмотки, как показали опыты, может оказаться меньше температуры ее наиболее горячей точки на  $5\text{—}10^{\circ}\text{C}$ .

Метод заложенных температурных детекторов дает температуру на  $5^{\circ}\text{C}$  меньше температуры наиболее горячей точки; в машинах постоянного тока этот метод не применяется, так как наиболее важная в тепловом отношении обмотка якоря во время работы машины недоступна, а передача показаний температурных детекторов через специальные трущиеся щетки оказалась ненадежной.

При измерении температуры обмотки по увеличению ее сопротивления исходят из выражения (503), дающего возрастание эл. сопротивления с ростом температуры.

Обозначив сопротивление обмотки при начальной температуре ее  $\theta_1$  через  $R_1$ , а сопротивление при температуре  $\theta_2$  через  $R_2$ , можно написать:

$$R_1 = \varrho_{20} [1 + (\theta_1 - 20) \alpha], \quad R_2 = \varrho_{20} [1 + (\theta_2 - 20) \alpha]. \quad (567)$$

Здесь  $\varrho_{20}$  — известное удельное сопротивление материала, из которого сделана обмотка, при температуре в  $20^\circ \text{C}$ ,  $\alpha$  — температурный коэффициент материала. В случае меди (обычный случай) имеем  $\varrho = \frac{1}{57} \frac{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ , а  $\alpha = \frac{1}{254,5} \approx \frac{1}{255} = \alpha_{\text{Cu}}$ .

Тогда (567) можно переписать так:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{235 + \theta_2}{235 + \theta_1}.$$

Отсюда имеем:

$$\frac{R_2 - R_1}{R_1} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{235 + \theta_1}$$

или

$$\theta_2 - \theta_1 = \frac{R_2 - R_1}{R_1} (235 + \theta_1). \quad (568)$$

Обозначая температуру охлаждающего воздуха через  $\theta_0$  и вычитая из обеих частей уравнения (568), получаем следующее выражение:

$$(\theta_2 - \theta_1) - \theta_0 = \frac{R_2 - R_1}{R_1} (235 + \theta_1) - \theta_0$$

или, обозначая превышение температуры через  $\vartheta$ , находим:

$$\vartheta = \theta_2 - \theta_0 = \frac{R_2 - R_1}{R_1} (235 + \theta_1) + \theta_1 - \theta_0. \quad (569)$$

Для обмотки из алюминия температурный коэффициент сопротивления равен  $\alpha_{\text{Al}} = \frac{1}{265}$ , поэтому в формулах (568) и (569) нужно число 235 заменить на 245.

## 246. Предельные допустимые превышения температур для отдельных частей эл. машин и их обоснование

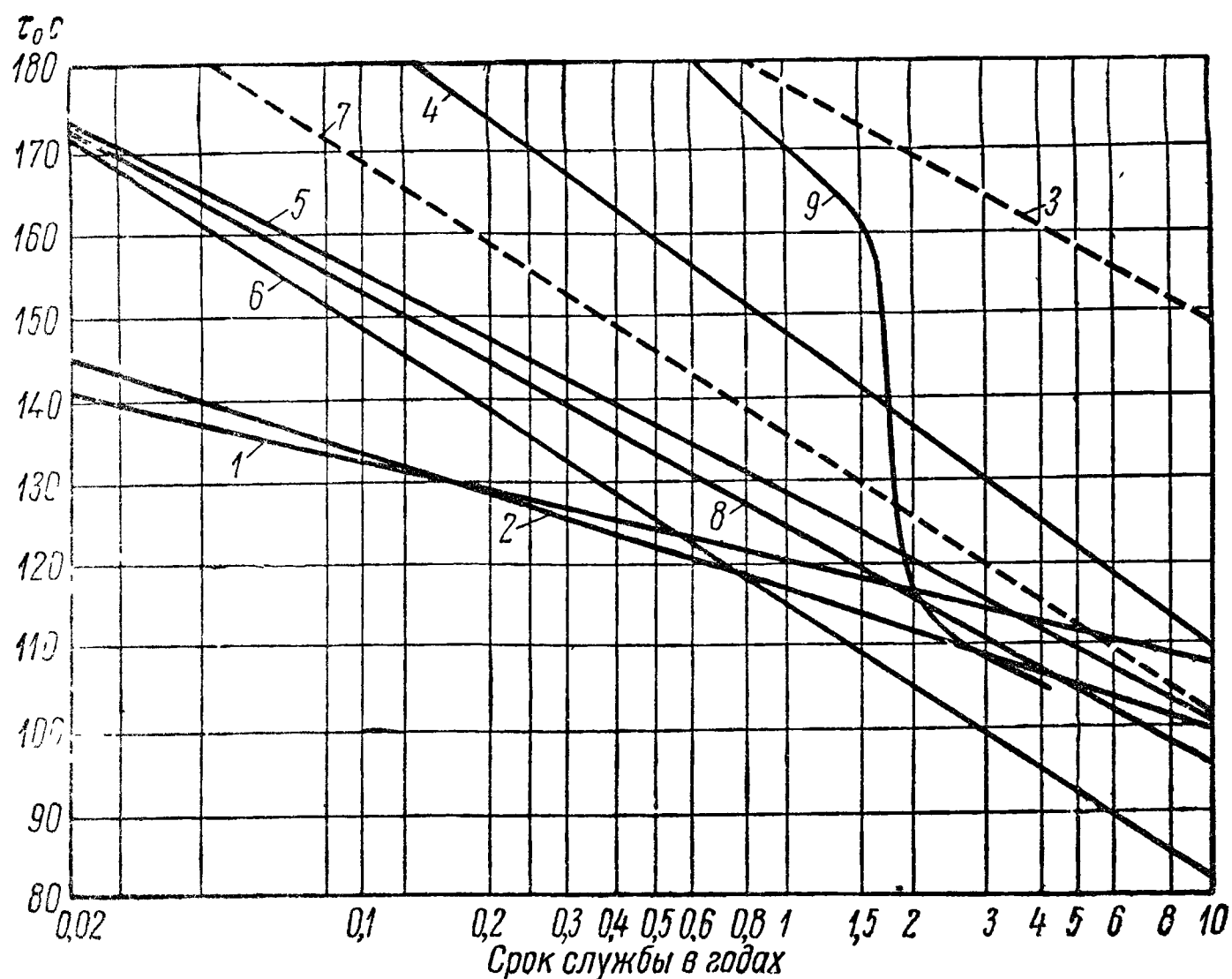
а) При выделении в той или иной части эл. машин потерь мощности, переходящих в тепло, температура тела и температура его внешних поверхностей возрастают. С ростом температуры внешних поверхностей твердого тела начинается рассеяние тепла, которое в тех пределах температур, с которыми приходится иметь дело в эл. машинах, возрастает с ростом превышения температуры над температурой окружающей среды практически пропорционально первой степени превышения температуры. Вследствие этого теплорассеяние все увеличивается и при неизменном количестве тепла, выделяемого в теле в единицу времени, наступает наконец момент времени, начиная с которого количество тепла, рассеиваемого в единицу времени с наружных поверхностей нагретого твердого тела, становится равным количеству тепла, выделяемого в теле в единицу времени. Очевидно, что после этого дальнейшее повышение температуры внешних поверхностей тела прекращается, — тело достигло предельного превышения температуры над температурой окружающей среды. Опытами установлено, что это превышение температуры  $\vartheta$  практически не зависит от начальной температуры  $\theta_0$  поверхностей тела. Таким образом, предельная достигаемая телом температура внешних поверхностей тела  $\theta$  при первоначальной температуре их, равной температуре окружающей среды  $\theta_0$ , будет равна сумме:

$$\theta = \vartheta + \theta_0, \quad (570)$$

т. е. будет зависеть от температуры окружающей среды  $\theta_0$

Вследствие этого, рассчитывая эл машину и считаясь с тем, что температура окружающей среды будет, согласно нормам, не больше  $\theta_0 = +35^\circ \text{C}$ , мы можем ориентироваться на предельное достигаемое телом превышение температуры  $\vartheta$ , зависящее, как указано выше, только от количества тепла (т. е. от потерь), выделяемого в теле в единицу времени

По этой причине в стандарте (ГОСТ 183-41, § 85) указываются предельные допустимые превышения температур для различных частей машины (табл. 25) при условии, что  $\theta_0 = +35^\circ \text{C}$ . При такой постановке вопроса тепловой расчет эл машины становится на реальную, твердую точку. Однако,



Фиг. 320. Кривые старения изолирующих материалов класса А и класса В по данным испытаний разных авторов.

1 — по ВВС (А), 2 — по Штейнметцу (А); 3 — по Штейнметцу (В), 4 — по Хобарту (А); 5 — по Монтсингеру (А) 6 — по Ланглюа-Бертело (А), 7 — по Ланглюа-Бертело (В); 8 — по Монтсингеру-Уолло (А), 9 — по Смит и Скотту (А).

как увидим ниже, при установлении предельных допустимых температур нужно учесть еще примененный метод измерения температур.

Наиболее чувствительной к повышению температур является изоляция электромашинных обмоток. В машинах постоянного тока имеем дело либо с изолирующими материалами класса А, либо с изолирующими материалами класса В. По этой причине только эти два класса и учитываются в табл. 25, представляющей собой извлечение из ГОСТ 183-41.

б) Подведение твердого обоснования под допустимые превышения температур впервые было сделано в начале второго десятилетия этого века, когда были опубликованы результаты опытов Штейнметца и Ламме.

Опубликованные результаты дают кривые зависимости от времени «старения» изолирующих материалов классов А и В» под влиянием непрерывно действующих на них температур. Под старением понимается потеря механических и изолирующих свойств вследствие постепенного обугливания материалов, что зависит не только от величины действующей температуры, но и от длительности ее приложения. Преобладающее значение, повидимому, имеет потеря механических свойств, в результате чего материал становится хрупким, рассыпается при встряске, а вследствие этого исчезают и его изолирующие свойства. Из фиг. 320 видно, что материал приходит в полную негодность (100%-ное старение) тем быстрее, чем выше действующая температура.



Таблица 25

Пределы допускаемых превышений температур при предельной допустимой температуре охлаждающего воздуха +35° С

№ п/п	Части машин	Изоляция класса А				Изоляция класса В			
		Метод термометра, °С	Метод сопротивления, °С	Метод заложённых температурных детекторов, °С		Метод термометра	Метод сопротивления	Метод заложённых температурных детекторов, °С	
				между катушками в одном пазу	между поверхностью катушки и дном паза			между катушками в одном пазу	между поверхностью катушки и дном паза
1 <sup>1</sup>	а) Обмотки переменного тока турбогенераторов мощностью в 5000 ква и выше								
2 <sup>2, 6</sup>	б) Обмотки переменного тока явнополюсных машин и асинхронных машин мощностью в 5000 ква и более или с длиной сердечника в 1 м и более . . . . .	—	—	65	55 <sup>3</sup>	—	—	85	75 <sup>3</sup>
3	а) Обмотки переменного тока машин более мелких, чем указанные в п 1								
	б) Обмотки возбуждения (многослойные) машин постоянного тока и переменного тока с возбуждением постоянным током, кроме указанных в пп. 3 и 4								
	в) Якорные обмотки, соединённые с коллектором .	60 <sup>3</sup>	65	—	—	75 <sup>3</sup>	85	—	—
4 <sup>2</sup>	а) Однорядные обмотки возбуждения . . . . .	70	70	—	—	95	95	—	—
	б) Обмотки возбуждения турбогенераторов и стержневые обмотки роторов асинхронных машин при числе стержней в пазу не более двух . . . . .	—	70	—	—	—	95	—	—
	Обмотки возбуждения малого сопротивления, имеющие несколько слоев, и компенсационные обмотки .	65	65	—	—	85	85	—	—
5	Изолированные обмотки, непрерывно замкнутые на себя	65	—	—	—	85	—	—	—
6	Неизолированные обмотки, непрерывно замкнутые на себя	<div>Превышение температур этих частей ни в коем случае не должно достигать величины, которая создавала бы риск повреждения изолирующих или других смежных материалов</div> <div>65°С — если изоляция обмоток принадлежит к классу А</div> <div>85°С — если изоляция обмоток принадлежит к классу В и при этом для изоляции листов активного железа применен соответствующий лак</div>							
7	Железные сердечники и другие части, не соприкасающиеся с обмотками								
8	Железные сердечники и другие части, соприкасающиеся с обмотками								
9	Контактные кольца как защищенные, так и незащищенные . . . . .	70	—	—	—	90	—	—	—

Продолжение табл 25

№ п/п	Части машин	Изоляция класса А				Изоляция класса В			
		Метод термометра, °С	Метод сопротивления, °С	Метод заложённых температурных детекторов, °С		Метод термометра	Метод сопротивления	Метод заложённых температурных детекторов, °С	
				между катушками в одном пазу	между поверхностью катушки и дном паза			между катушками в одном пазу	между поверхностью катушки и дном паза
10	Коллекторы <sup>4</sup> . . . . .	65	—	—	—	85	—	—	—
11	Подшипники скольжения	45	—	—	—	45	—	—	—
12 <sup>5</sup>	Подшипники качения . .	60	—	—	—	60	—	—	—

<sup>1</sup> В случае применения метода встраиваемых детекторов при контрольных испытаниях машин этих категорий допускаемые превышения температур для пазных частей обмотки не должны превышать 65°С для изоляции класса А и 85°С—для изоляции класса В.

<sup>2</sup> Одновременное измерение превышения температуры по методу термометра и по методу сопротивления не требуется, так как величины превышения температур, данные в настоящей таблице для измерения по методу термометра и для измерения по методу сопротивления, не могут применяться для взаимного контроля. Если в некоторых специальных случаях желательно иметь отсчет по термометру или по встроенному температурному детектору в дополнение к величинам, полученным по методу сопротивления, то допускаемое превышение температуры по термометру или встроенному температурному детектору, помещенному в наиболее горячую точку, не должно превышать 70°С—если обмотка изолирована материалами класса А, и 90°С—если обмотка изолирована материалами класса В

<sup>3</sup> Для обмоток машин переменного тока, изолированных для номинального напряжения, превышающего 11000 в, пределы превышения температур, определяемые термометром, или заложёнными детекторами, должны быть снижены против вышеуказанных данных на 1,5°С на каждые 1000 в или часть 1000 в сверх 11000 з. Превышения температур обмоток, изолированных на напряжение, больше 16 000 в, должны быть предметом особого соглашения между заказчиком и заводом-изготовителем.

<sup>4</sup> Указание класса изоляции относится к изоляции обмотки, соединяемой с коллектором.

<sup>5</sup> В случае применения специальных подшипников качения, для которых заводами, их изготовляющими, допускаются большие превышения температур, чем указано здесь, эти превышения могут быть соответственно повышены.

<sup>6</sup> Указанные для этих обмоток пределы превышений температур по методу сопротивления повышаются на 5°С для закрытых машин напряжением не свыше 1500 в

До опубликования этих опытных данных заводы, как правило, шли осторожно и допускали небольшие температуры нагревания эл. машин или (что то же, при исходной неизменной температуре окружающего воздуха  $\theta_0 = +35^{\circ}\text{C}$ ) небольшие превышения температур. Вследствие этого в начале текущего века нередко можно было услышать такую оценку добротности машины постоянного тока: «машина хорошая, совсем не искрит и почти не греется, свободно можно держать руку...» Ныне такая оценка была бы, по меньшей мере, неуместной. Требование к безискровой коммутации, конечно, попрежнему сохраняется и даже стало строже, но взгляд на нагревание машины кардинально изменился. Оценку хорошей заслуживает теперь не та эл. машина, которая «почти не греется», ибо это свидетельствует о большой затрате материалов на ее изготовление, а та, которая греется, но в пределах, обеспечивающих приемлемый срок службы изоляции ее обмоток. Таким пределом допускаемой

температуры для изолирующих материалов класса А принимается  $105^{\circ}\text{C}$ , а для изолирующих материалов класса В —  $130^{\circ}\text{C}$ , при этих температурах говорить о свободном держании руки не приходится. Эти температуры обеспечивают срок службы машины в 12—15 лет, что считается вполне достаточным, так как в большинстве случаев за этот срок эл. машина успевает уже «морально устареть» вследствие достигаемых за этот срок успехов электромашиностроения. А если за этот срок эл. машина еще не сильно устарела, то она себя уже успела оправдать, и ремонт ее с заменой изоляции обмоток, в случае выявившейся надобности, является вполне законным.

Перепады температур от наиболее горячих точек учитываются в табл. 25, тем, что допустимые температуры указываются в таблице в зависимости от примененного метода измерения температуры и с учетом как свойств метода измерения температур, так и способов выполнения обмоток, что влияет на значение перепада температуры  $\Delta\theta$ . Так, для обмоток добавочных полюсов при выполнении их в один слой из навитой на ребро медной шины с такими изолирующими прокладками между витками, что наружные торцы витков остаются голыми, температура обмотки, измеренная термометром на этих торцах, будет, очевидно, практически равняться температуре в любом другом ее месте, поэтому допустимое превышение температуры может быть принято как разность между температурой, измеренной термометром, и температурой окружающего воздуха. Для изолирующего материала класса А для данного случая выполнения обмотки указывается допустимое предельное превышение температуры по термометру в  $\vartheta_m = 70^{\circ}\text{C}$ , которое, будучи сложением с предельной допускаемой температурой для окружающего воздуха  $\theta_0 = +35^{\circ}\text{C}$ , даст предельную возможную для этого класса изоляции (класс А) температуру  $\theta_m = 70^{\circ} + 35^{\circ} = 105^{\circ}\text{C}$ , так как в данном случае  $\Delta\theta = 0$ .

С другой стороны, для полюсных катушек параллельного возбуждения (выполненных многослойными из тонкого изолированного провода с изолирующим материалом класса А) при измерении температуры термометром допустимое превышение температуры указано в табл. 26 равным  $\vartheta_m = 60^{\circ}\text{C}$ , т. е. учтен перепад температуры от наиболее горячей точки обмотки в  $\Delta\theta = 10^{\circ}\text{C}$ ; при измерении температуры по сопротивлению допустимое предельное превышение указано равным  $\vartheta_m = 65^{\circ}\text{C}$ , т. е. перепад учтен  $\Delta\theta = 5^{\circ}\text{C}$ . Таким образом, предельное допустимое превышение температуры  $\vartheta_m$  для данного класса изолирующих материалов и при данном методе измерения температур определяется по формуле:

$$\vartheta_m = \theta_m - \Delta\theta - \theta_0. \quad (571)$$

Здесь  $\theta_m$  — предельная допустимая температура для изолирующего материала данного класса,  $\Delta\theta$  — вероятное значение перепада температуры от наиболее горячей точки при избранном методе измерения температуры, а  $\theta_0$  — предельная допустимая температура окружающего воздуха (среды), принимаемая равной  $+35^{\circ}\text{C}$  (для подавляющего большинства эл. машин).

Нужно отметить еще, что при составлении табл. 25 учтено, кроме того, одно важное обстоятельство, а именно, что обычно эл. машина лишь незначительную часть времени работает при своей полной номинальной нагрузке и что редко температура окружающей среды длительно доходит до предельно допустимой, т. е. до  $+35^{\circ}\text{C}$ . Вследствие этого старение изолирующих материалов идет более медленно, что удлиняет срок их службы. Этим объясняется, почему перепады температур  $\Delta\theta$  в обмотках учтены в табл. 25 по минимуму из опытных данных, а именно  $\Delta\theta = 10^{\circ}\text{C}$  для метода термометра и  $\Delta\theta = 5^{\circ}\text{C}$  для метода сопротивления. Для снижения перепадов температур  $\Delta\theta$  полюсных катушек ныне при изготовлении машин постоянного тока принимают на основании опыта меры к увеличению теплорассеяния этих катушек путем

устройства у них поперечных или продольных вентиляционных каналов (гл. I, § 42, п. «б») и избегают, по возможности, толщин полюсных катушек, превосходящих 5—6 см.

## Б. РАССЕЙАНИЕ ТЕПЛА С ВНЕШНИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НЕИЗМЕННО НАГРЕВАЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА

### 247. Виды теплорассеяния с внешних поверхностей неизменно нагреваемого твердого тела

Под «неизменно нагреваемым твердым телом» понимается твердое тело, в котором, начиная с определенного момента времени, выделяется в каждую единицу времени некоторое неизменяющееся количество тепла. В случае эл. машины, работающей при неизменной нагрузке, это тепло порождается неизменными по величине в единицу времени потерями энергии, соответствующими нагрузке эл. машины.

Вследствие начавшегося в твердом теле выделения тепла температура твердого тела и его внешних поверхностей начинает возрастать над температурой окружающего тело воздуха (среды). Под влиянием этой разницы температур с внешних поверхностей тела начинает рассеиваться тепло по двум причинам: во-первых, вследствие лучистого теплоизлучения, во-вторых, в результате теплопроводности окружающей среды и конвекции тепла. Лучистое теплоизлучение зависит только от разности между температурой внешней поверхности тела и температурой окружающей среды; оно совершенно не зависит от того, движется ли тело или пребывает в покое. Наоборот, рассеяние тепла вследствие теплопроводности и конвекции зависит не только от упомянутой разности температур, но и, в значительной степени, от движения тела и от искусственного перемещения окружающей среды, если таковое имеет место.

Теплопроводность окружающей среды при неподвижном теле является первопричиной конвекции, которая состоит в том, что ближайšie к телу частицы воздуха (среды), вследствие подогрева их из-за соприкосновения с нагретыми поверхностями тела, приходят в движение, поднимаясь вверх, на их место поступают новые, холодные частицы, которые, в свою очередь, нагреваются, и таким образом постепенно образуется ток воздуха (среды), а с ним и удаление тепла с внешних нагретых поверхностей тела. Это теплорассеяние с нагретых поверхностей тела является теплорассеянием через «теплопроводность и естественную конвекцию», что представляет собою единый процесс, поэтому его можно называть кратко е с т е с т в е н н о й к о н в е к ц и е й.

Если тело движется, то это вызывает более интенсивное движение воздуха и удаление тепла. Еще более интенсивное удаление тепла с внешних поверхностей тела происходит в том случае, если тело обдувается вентилятором. Этот вид теплорассеяния является теплорассеянием через теплопроводность и усиленную конвекцию, что по вышеуказанным мотивам можно сокращенно называть теплорассеянием через у с и л е н н у ю к о н в е к ц и ю т е п л а.

Рассеяние тепла твердым телом через тепловое излучение (лучеиспускание) и через теплопроводность и естественную конвекцию будем называть с у м м а р н ы м е с т е с т в е н н ы м т е п л о р а с с е я н и е м, а при наличии передвижения поверхностей или искусственной вентиляции — их с у м м а р н ы м у с и л е н н ы м т е п л о р а с с е я н и е м.

### 248. Лучистое рассеяние тепла

Рассеяние тепла с внешних поверхностей неизменно нагреваемого твердого тела через лучеиспускание зависит не только от характера поверхностей самого нагретого тела, но и от характера поверхностей окружающих пред-

метов, так как последние могут часть падающих на них тепловых лучей отражать обратно.

В предположении, что отражения тепловых лучей от окружающих предметов нет, можно, по закону Стефана и Больцмана, для тепла, излучаемого абсолютно черным телом в пустоте в 1 сек с 1 м<sup>2</sup> внешней поверхности, написать:

$$q_s = \beta (T_s^4 - T_0^4) \text{ [вт/м}^2\text{]}. \quad (572)$$

Здесь  $T_s$  и  $T_0$  — абсолютные температуры в °К абсолютно черного тела и окружающей среды;  $\beta$  — экспериментально определенная величина теплоизлучения; она оказалась для абсолютно черного тела лежащей в пределах  $\beta = (5,45 \div 5,85) \cdot 10^{-8}$ , а поэтому можно в среднем принять:

$$\beta = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ вт/}^\circ\text{К}^4 \cdot \text{м}^2. \quad (573)$$

Таким образом, можно написать:

$$q_s = 5,7 \cdot 10^{-8} (T_s^4 - T_0^4) \text{ [вт/м}^2\text{]}. \quad (572a)$$

Чтобы учесть отступления теплоизлучающей поверхности интересующего нас тела от теплоизлучения поверхности абсолютно черного тела, в эту формулу вводят поправочный безразмерный множитель  $\nu$ :

$$q_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \nu (T_s^4 - T_0^4) \text{ [вт/м}^2\text{]}. \quad (572b)$$

Очевидно, что для абсолютно черного тела  $\nu = 1$ , для прочих тел  $\nu < 1$ . Для поверхностей эл. машин, как то. окрашенного и неокрашенного железа, бумаги и волокнистой изоляции, промасленной или без масла, можно принять в среднем  $\nu = 0,92$ . При этом предполагается, что в окружающем пространстве нет поверхностей, отражающих тепло. Чтобы частично учесть наличие таких поверхностей, можно положить  $\nu = 0,85$ . Тогда формула (572b) переписывается так:

$$q_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot 0,85 (T_s^4 - T_0^4) = 4,85 \cdot 10^{-8} (T_s^4 - T_0^4) \text{ [вт/м}^2\text{]}. \quad (574)$$

Формулу (574) можно представить так

$$\begin{aligned} q_s &= 4,85 \cdot 10^{-8} (T_s - T_0) \cdot [(T_s + T_0)(T_s^2 + T_0^2)] = \\ &= \{4,85 \cdot 10^{-8} (T_s + T_0)(T_s^2 + T_0^2)\} (T_s - T_0) = h_s \vartheta, \end{aligned} \quad (575)$$

где обозначено:

$$h_s = 4,85 \cdot 10^{-8} (T_s + T_0)(T_s^2 + T_0^2), \quad (576)$$

$$\vartheta = T_s - T_0 \quad (577)$$

Здесь разность  $T_s - T_0$  можно переписать так.

$$T_s - T_0 = (273 + t_s) - (273 + t_0) = t_s - t_0, \quad (578)$$

где  $t_s$  и  $t_0$  — в градусах столбчатой шкалы

Таким образом,

$$\vartheta = t_s - t_0. \quad (577a)$$

Нетрудно убедиться вычислением, что выражение (576) для  $h_s$  изменяется по численной величине относительно незначительно в пределах тех изменений  $T_s$  и  $T_0$ , с которыми практически имеем дело в области эл. машин.

Это иллюстрировано в табл. 26; в ней приведены результаты вычислений  $h_s$  по теоретической формуле (576) для трех значений температуры окружающей среды  $T_0 = 273 + t_0$ , где  $t_0 = 10, 20$  и  $30^\circ \text{C}$ , а  $\vartheta$  взято в пределах от  $10$  до  $80^\circ \text{C}$ .



Таблица 26

Теплорассеяние  $h_s$  через лучеиспускание в  $вт/град \cdot м^2$ , вычисленное по теоретической (576) и по упрощенной (579) формулам для  $\nu = 0,85$

$\vartheta, ^\circ C$	$t_0 = 10^\circ C$		$t_0 = 20^\circ C$		$t_0 = 30^\circ C$	
	Вычислено по формуле		Вычислено по формуле		Вычислено по формуле	
	(576)	(579)	(576)	(579)	(576)	(579)
10	4,65	4,5	5,16	5,1	5,69	5,7
20	4,91	4,8	5,42	5,4	5,98	6,0
30	5,17	5,1	5,71	5,7	6,28	6,3
40	5,44	5,4	6,05	6,0	6,59	6,6
50	5,73	5,7	6,30	6,3	6,91	6,9
60	6,03	6,0	6,62	6,6	7,25	7,2
70	6,34	6,3	6,95	6,9	7,60	7,5
80	6,67	6,6	7,30	7,2	7,98	7,8

Построив по табл. 26 зависимость  $h_s = f(\vartheta)$  для трех указанных значений  $t_0$ , видим, что с достаточной для практики точностью можно представить  $h_s$  формулой:

$$h_s = 4,2 + 0,06 (t_0 - 10^\circ) + 0,03 \vartheta [вт/град \cdot м^2].$$

(579)

Значения  $h_s$ , вычисленные по этой упрощенной формуле, также внесены в табл. 27.

Для того чтобы получить все количество тепла, излучаемого в 1 сек. с внешней поверхности  $S_s$  тела, нужно выражение (579) умножить на эту поверхность. При этом, вычисляя  $S_s$ , нужно исключить те части внешней поверхности, которые взаимно облучают друг друга. При превышении температуры тела над температурой окружающей среды на  $\vartheta^\circ C$  получим, таким образом:

$$Q_s = h_s \vartheta S_s,$$

(580)

где  $h_s$  берется по (579), а  $\vartheta$  — по (577а).

В среднем, в пределах  $\vartheta = 10 \div 80^\circ$ , обычно берут:

$$h_s = 6 \text{ вт/град} \cdot м^2.$$

(581)

Так как по табл. 26 значения  $h_s$  лежат в пределах

$$h_s = (4,65 \div 7,98) \text{ вт/град} \cdot м^2,$$

то, приняв  $h_s = 6$  по (581), мы делаем ошибку (от  $-22,5\%$  до  $+28,3\%$ ); при этом, однако, нужно иметь в виду, что, вычисляя  $Q_s$  по (580), можно определить  $S'_s$  лишь весьма приближенно, поэтому обычно исходят из приближенного значения  $h_s = 6 \text{ вт/град} \cdot м^2$ .

Лучистое теплорассеяние, как уже отмечалось, не зависит от того, находится ли излучающая поверхность в покое или движется.

249

Рассеяние тепла через теплопроводность и естественную конвекцию  
тепла

Теплопроводность воздуха очень мала; при  $0^\circ C$  и давлении в 760 мм рт. ст. она равна всего  $0,022 \text{ вт/град} \cdot м^2$ , по сравнению с теплопроводностью железа, равной  $45\text{—}50 \text{ вт/град} \cdot м^2$ , это примерно в 2000 раз меньше, а по сравнению с медью, имеющей теплопроводность в  $350\text{—}388 \text{ вт/град} \cdot м^2$ , в 16 000—17 000 раз меньше. Если несмотря на это воздух достаточно эффективно отводит тепло от нагретой поверхности твердого тела, то это объясняется упомянутыми потоками воздуха и соприкосновением с нагретой поверхностью тела все новых и новых слоев окружающего воздуха (конвекцией).

В области температур, с которыми приходится иметь дело в электромашиностроении, рассеяние тепла через теплопроводность и естественную конвекцию  $h_k$  можно принять на основании опытных данных по формуле:

$$h_k = 6,5 + 0,05 \vartheta \text{ [вт/град } \cdot \text{ м}^2], \quad (582)$$

где  $\vartheta$  — превышение в °С температуры поверхности твердого тела над температурой окружающего воздуха.

Теплорассеяние  $h_k$  зависит от поверхности  $S_k$ , соприкасающейся с воздушным течением. При подсчете  $S_k$  нужно исключать те поверхности тела, к которым охлаждающая среда не имеет доступа. Таким образом, рассеяние тепла со всей поверхности тела при превышении температуры ее над температурой окружающего воздуха в  $\vartheta^\circ \text{ С}$  и при поверхности  $S_k$  (в кв. метрах) будет равна:

$$Q_k = h_k \vartheta S_k \text{ [вт]}, \quad (583)$$

здесь  $h_k$  по (582) В среднем обычно берут

$$h_k = 8 \text{ вт/град } \cdot \text{ м}^2.$$

## 250. Суммарное естественное теплорассеяние

В том случае, когда вся соприкасающаяся с окружающей средой поверхность  $S$  может быть принята как за теплоизлучающую поверхность, так и за поверхность, с которой происходит естественная конвекция тепла, можно получить общее теплоизлучение с 1 м<sup>2</sup> поверхности  $S$  в 1 сек., сложив формулы (580) и (583):

$$Q = Q_k + Q_s = (h_k + h_s) \vartheta S = h_\Sigma \vartheta S \text{ [вт]}, \quad (584)$$

где по (579) и (582) имеем:

$$\begin{aligned} h_\Sigma = h_s + h_k &= 4,2 + 0,06 (t_0 - 10^\circ) + 0,03 \vartheta + (6,5 + 0,05 \vartheta) = \\ &= 10,7 + 0,06 (t_0 - 10^\circ) + 0,08 \vartheta. \end{aligned} \quad (585)$$

Положив здесь  $t_0 = 20^\circ \text{ С}$  и  $\vartheta = 35^\circ \text{ С}$ , получим:

$$h_\Sigma = 10,7 + 0,06 \cdot 10 + 0,08 \cdot 35 \approx 14,0 \text{ вт/град } \cdot \text{ м}^2. \quad (586)$$

## 251. Суммарное усиленное теплорассеяние

При движении неизменно нагреваемого тела и, в особенности, при искусственном обдувании воздухом его поверхностей, отвод тепла от них значительно увеличивается по сравнению с отводом тепла через естественную конвекцию. Это вызывается тем, что теперь нагретые частицы воздуха быстрее удаляются от поверхности тела и заменяются новыми, более холодными частицами. Разница с естественной конвекцией тепла, однако, была бы не столь заметной, если бы движение воздуха происходило струями, параллельными поверхностям тела. Но при обычно применяемых скоростях вентилируемого воздуха (более 2 м/сек) воздух приходит в вихревое движение, при котором нагретые частицы воздуха внедряются в среду холодных, и вследствие такого перемешивания вентилируемого воздуха получается во много раз более интенсивный теплоотвод от нагретых поверхностей тела. Тепловое излучение имеет при этом процессе настолько малое влияние на общий отвод тепла, что его можно отдельно не учитывать.

Вопросу об отводе тепла при помощи вентиляции от поверхностей неизменно нагреваемого твердого тела было посвящено очень большое число исследований, которые, однако, не привели к таким результатам,

которые можно было охватить расчетными формулами, применимыми к эл. машинам. Это объясняется в значительной степени влиянием характера завихрения вентилирующего воздуха, что, вследствие зависимости его от конфигурации поверхностей отдельных частей эл. машин, не поддается учету.

Пришлось избрать другой путь, а именно пойти на вычисление объема воздуха, необходимого в секунду для уноса из машины всех ее греющих потерь<sup>1</sup> при условии, что температура вентилирующего воздуха повысится в машине не более чем на определенное число градусов. При этих условиях удастся обеспечить превышения температур отдельных частей эл. машины, не выходящие за предельные допустимые значения.

## В. ТЕОРИЯ НАГРЕВАНИЯ И ОСТЫВАНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ОДНОРОДНОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ К ТЕПЛОВЫМ ПРОЦЕССАМ В ЭЛ. МАШИНАХ

### 252. Постановка задачи

Отдельные части эл. машин имеют сложную конфигурацию и изготавливаются из многих разнородных материалов, обладающих неодинаковыми тепловыми свойствами, — теплоемкостью, теплопроводностью. Кроме того, потери энергии в отдельных частях эл. машины вызываются различными физическими явлениями, имеют разную величину и разное распределение. Вследствие совокупности указанных причин тепловые процессы, происходящие во вращающейся нагруженной эл. машине, весьма сложны. Для того чтобы разобраться в них, целесообразно рассмотреть сначала нагревание и остывание идеального однородного твердого тела, в котором вследствие его особых свойств все тепловые процессы поддаются легко воспринимаемой интерпретации и могут быть охвачены простыми закономерностями. Установив эти закономерности, мы применим их затем к эл. машинам с соответствующими коррективами.

Под «однородным твердым телом» понимается твердое тело (что не нуждается в пояснении), сделанное из одного и того же материала и обладающее во всех своих частях одинаковыми свойствами (однородное тело). Под термином «идеальное» в применении к интересующей нас проблеме понимается 1) совершенно одинаковые теплорассеивающие свойства поверхностей тела, 2) выделение тепла, равномерное во всех частях тела, и 3) отсутствие перепадов температур внутри тела.

### 253. Процесс нагревания идеального однородного твердого тела

Рассмотрим теоретический случай, а именно нагревание идеального однородного твердого тела, как оно было определено в § 252.

Пусть  $Q$  — количество тепла в ваттах, выделяющееся в теле в 1 сек. Тогда за бесконечно малый промежуток времени  $dt$  в теле выделится  $Qdt$  ватт.

Обозначим через  $S$  внешнюю поверхность тела в  $см^2$ , а через  $h$  — суммарное теплорассеяние тела в 1 сек., выраженное в ваттах на  $1 см^2$  поверхности тела и на  $1^\circ C$  превышения температуры тела над температурой окружающей среды. За промежуток времени  $dt$  со всей поверхности тела  $S$  при превышении ее температуры над температурой окружающей среды на  $\vartheta^\circ C$ , рассеивается  $Sh\vartheta dt$  ватт.

Разность, равная

$$Q dt - Sh\vartheta dt [em], \quad (587)$$

<sup>1</sup> Часть потерь мощности в эл. машине, а именно потери в подшипниках, рассеиваются независимо, и в нагревании ее не участвуют. Это заставляет разделять потери мощности в эл. машине на греющие и негреющие.

пойдет, очевидно, на повышение температуры тела. Если вес тела в кг обозначим через  $G$ , а выраженное в ваттах количество тепла, необходимое для нагрева 1 кг тела на  $1^\circ \text{C}$ , обозначим через  $c$ , то для нагрева тела на  $d\vartheta$  градусов потребуется

$$Gc d\vartheta \text{ [вт]}. \quad (588)$$

Приравняв выражение (587) выражению (588), получим дифференциальное уравнение, которое характеризует собой исследуемый процесс нагревания идеального однородного твердого тела:

$$Q dt - Sh\vartheta dt = Gc d\vartheta. \quad (589)$$

С возрастанием  $\vartheta$  второй член ( $Sh\vartheta dt$ ) в левой части этого уравнения (тепло, рассеиваемое поверхностью  $S$  тела за промежуток времени  $dt$ ) увеличивается, в то время как первый член  $Q dt$  — тепло, выделяющееся в теле за этот же промежуток времени, остается неизменным; вследствие этого правая часть уравнения  $Gc d\vartheta$ , т. е. тепло, идущее на повышение температуры тела, будет с возрастанием  $\vartheta$  постепенно уменьшаться и, наконец, станет равной нулю, с этого момента времени температура тела, а следовательно, и ее превышение  $\vartheta$  над температурой окружающей среды возрастать не будет, и наступит установившийся тепловой режим, при котором количество тепла, выделяемого в теле в единицу времени, будет полностью рассеиваться с поверхности тела. Обозначив установившееся превышение температуры тела над температурой окружающей среды через  $\vartheta_m$  и положив правую часть уравнения (589) равной нулю, имеем:

$$Q dt - Sh\vartheta_m dt = 0 \quad \text{или} \quad Q = Sh\vartheta_m, \quad (590)$$

откуда

$$\vartheta_m = \frac{Q}{Sh}. \quad (591)$$

Как видим, конечное превышение температуры тела  $\vartheta_m$  над температурой окружающей среды вовсе не зависит от теплоемкости тела; оно всецело определяется количеством тепла  $Q$ , выделяемого в теле в 1 сек., размерами поверхности тела  $S$  и теплорассеянием с единицы поверхности  $h$ .

Пользуясь (590), перепишем (589) так:

$$Q \left(1 - \frac{\vartheta}{\vartheta_m}\right) dt = Gc d\vartheta,$$

отсюда

$$\frac{d\vartheta}{\vartheta_m - \vartheta} = \frac{Q}{Gc\vartheta_m} dt.$$

Введем обозначение:

$$T = \frac{Gc\vartheta_m}{Q} \quad (592)$$

и назовем  $T$  постоянной времени нагревания тела (физический смысл пояснен дальше). Тогда

$$\frac{d\vartheta}{\vartheta_m - \vartheta} = \frac{dt}{T}. \quad (593)$$

Интегрируя, получаем:

$$t = -T \ln(\vartheta_m - \vartheta) + C \quad (594)$$

Если в начале рассматриваемого процесса, т. е. когда  $t = 0$ , температура тела выше температуры окружающей среды на  $\vartheta_0$ , то из (594) получим:

$$0 = -T \ln (\vartheta_m - \vartheta_0) + C,$$

откуда

$$C = T \ln (\vartheta_m - \vartheta_0). \quad (594a)$$

Подставляя это в (594), находим:

$$t = -T \ln (\vartheta_m - \vartheta) + T \ln (\vartheta_m - \vartheta_0) = -T \ln \frac{\vartheta_m - \vartheta}{\vartheta_m - \vartheta_0}, \quad (595)$$

$$-\frac{t}{T} = \ln \frac{\vartheta_m - \vartheta}{\vartheta_m - \vartheta_0} \quad (596)$$

или

$$\frac{\vartheta_m - \vartheta}{\vartheta_m - \vartheta_0} = e^{-\frac{t}{T}}.$$

Здесь  $e$  — основание натуральных логарифмов.

Решая относительно  $\vartheta$ , находим:

$$\vartheta = \vartheta_m (1 - e^{-\frac{t}{T}}) + \vartheta_0 e^{-\frac{t}{T}} \quad (597)$$

Если при  $t = 0$  и  $\vartheta_0 = 0$ , то уравнения (596) и (597) упрощаются.

$$-t = T \ln \left( \frac{\vartheta_m - \vartheta}{\vartheta_m} \right), \quad (596a)$$

$$\vartheta = \vartheta_m (1 - e^{-\frac{t}{T}}). \quad (597a)$$

Это представляет собой уравнение возрастающей экспоненты, оно построено на фиг. 321. Уравнение характеризует процесс нагревания тела, начатый от температуры его, совпадающей с температурой окружающей среды, т. е. с  $\vartheta = 0$ . Из уравнения (597a) следует, что установившееся значение  $\vartheta = \vartheta_m$  может быть достигнуто только через бесконечно большое время, так как только при  $t = \infty$  выражение  $e^{-\frac{t}{T}} = 0$ , а следовательно, только тогда достигается значение  $\vartheta = \vartheta_m$ .

Как следует из (597a), вид кривой  $\vartheta = f(t)$  зависит от  $\vartheta_m$  и  $T$ , следовательно, для любой пары значений  $\vartheta_m$  и  $T$  мы получим свою кривую.

Разделив уравнение (597a) на  $\vartheta_m$  и введя обозначения:

$$\delta = \frac{\vartheta}{\vartheta_m} \quad \text{и} \quad \tau = \frac{t}{T}, \quad (598)$$

мы получим:

$$\delta = 1 - e^{-\tau}. \quad (599)$$

Очевидно, что в таком виде, когда переменные  $\delta$  и  $\tau$  выражены в относительных единицах (а именно превышение температуры выражено в долях  $\vartheta_m$ , а время — в долях  $T$ ), все кривые нагревания идеального твердого тела превращаются в одну (599); получаем универсальную кривую нагревания идеального однородного твердого тела, общую для всех таких тел.

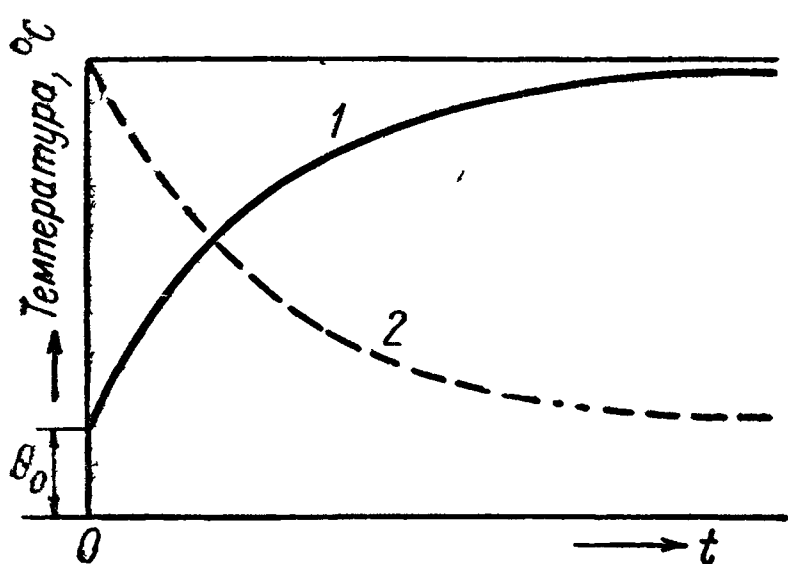


Давая  $\tau$  ряд целых значений и вычисляя  $\delta$ , получим табл. 27

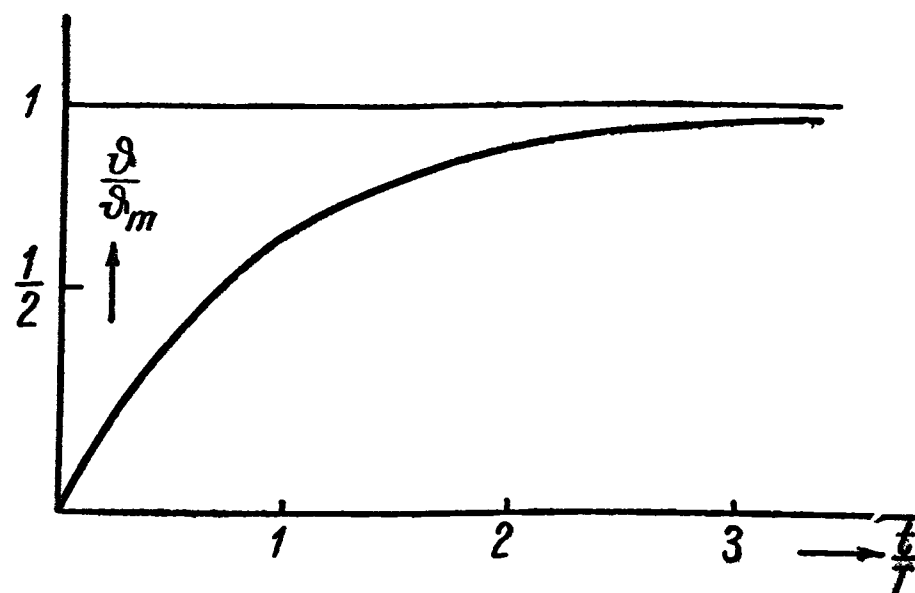
Таблица 27

Расчет универсальной кривой нагревания идеального однородного твердого тела по (599)

$\tau$	1	2	3	4	5	6	7	8
$e^{-\tau}$	0,3679	0,1353	0,0498	0,0183	0,0067	0,0025	0,0009	0,0003
$\delta$	0,6321	0,8647	0,9502	0,9817	0,9933	0,9975	0,9991	0,9997



Фиг. 321. Кривые нагревания (1) и остывания (2) идеального однородного твердого тела.



Фиг. 322. Кривая нагревания идеального однородного твердого тела в долях единиц.

Отсюда видим, что через доленое время  $\tau = S \frac{t}{T} = 1$  превышение температуры тела (в долях  $\vartheta_m$ )  $\delta = \vartheta/\vartheta_m = 0,6321$ , т. е. равно 63% конечного значения, а через время  $\tau = \frac{t}{T} = 4$  превышение будет отличаться от конечной температуры всего на 2%. Так как всякое измерение возможно лишь с некоторой точностью, то практически через время  $\tau = 4$  или  $\tau = 5$  можно считать конечную температуру достигнутой (фиг. 322).

Выясним теперь физический смысл постоянной  $T$ , для этого вернемся к уравнению (597а) и возьмем производную от  $\vartheta$  по  $t$ .

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \frac{\vartheta_m}{T} e^{-\frac{t}{T}}. \quad (600)$$

Это уравнение определяет наклон касательной к кривой в любой точке, определяемой абсциссой  $t$ . Приняв  $t = 0$ , получим:

$$\left(\frac{d\vartheta}{dt}\right)_{t=0} = \frac{\vartheta_m}{T} = \operatorname{tg} \gamma_0, \quad (601)$$

где  $\gamma_0$  — угол наклона касательной в начале координат, в точке  $O$ . Если мы проведем через точку с ординатой  $\vartheta = \vartheta_m$  линию, параллельную оси абсцисс, то на ней упомянутая касательная отсечет отрезок, равный  $T$ . Сопоставляя это с выражением для  $T$  (592):

$$T = \frac{Gc\vartheta_m}{Q},$$

приходим к выводу, что  $T$  представляет собой то время, в течение которого идеальное однородное твердое тело, имеющее удельную теплоемкость  $c$  и вес  $G$ , нагреется на  $\vartheta_m^\circ$ , если в нем каждую секунду будет выделяться тепло  $Q$ .

и если нет никакого рассеяния тепла с боковой поверхности. В этом случае нагрев тела будет происходить не по экспоненте, а по прямой, касательной к ней в начале координат (601).

Подставляя в (592) выражение для  $Q$  из (590), получаем

$$T = \frac{Gc\vartheta_m}{Q} = \frac{Gc\vartheta_m}{Sh\vartheta_m} = \frac{Gc}{Sh}. \quad (602)$$

Отсюда следует, что постоянная времени нагревания  $T$  не зависит от количества тепла, выделяющегося в теле в единицу времени, и определяется, с одной стороны, полной теплоемкостью тела ( $Gc$ ), а с другой стороны, его способностью рассеивать теплоту ( $Sh$ ). Из выражения (602), кроме того, следует, что если имеем два однородных тела (те же значения  $c$  и  $h$ ), то постоянная времени будет больше для того тела, для которого отношение  $G/S$  больше. А так как с изменением геометрических размеров тела его объем, а следовательно, и вес  $G$  растут пропорционально третьей степени его линейных размеров, а боковая поверхность растет пропорционально второй степени линейных размеров, то отношение  $G/S$ , а следовательно и  $T$ , будет расти прямо пропорционально первой степени линейных размеров тела. Иначе говоря, из двух геометрически подобных и физически однородных идеальных твердых тел большее по размерам тело имеет большую постоянную времени нагревания  $T$ .

Беря по (600) выражения для угловых коэффициентов касательных в разных точках кривой нагревания, получаем:

$$\left. \begin{aligned} t = T, \quad \left( \frac{d\vartheta}{dt} \right)_{t=T} &= \frac{\vartheta_m}{T} e^{-1} = \frac{0,3679 \vartheta_m}{T} = \operatorname{tg} \gamma_1; \\ t = 2T, \quad \left( \frac{d\vartheta}{dt} \right)_{t=2T} &= \frac{\vartheta_m}{T} e^{-2} = \frac{0,1353 \vartheta_m}{T} = \operatorname{tg} \gamma_2, \\ t = 3T, \quad \left( \frac{d\vartheta}{dt} \right)_{t=3T} &= \frac{\vartheta_m}{T} e^{-3} = \frac{0,0498 \vartheta_m}{T} = \operatorname{tg} \gamma_3, \\ t = 4T, \quad \left( \frac{d\vartheta}{dt} \right)_{t=4T} &= \frac{\vartheta_m}{T} e^{-4} = \frac{0,0183 \vartheta_m}{T} = \operatorname{tg} \gamma_4. \end{aligned} \right\} \quad (603)$$

Из этого следует, что касательные, проведенные через точки кривой, которые соответствуют моментам времени, кратным  $T$ , отсекают на прямой, выражаемой уравнением  $\vartheta = \vartheta_m$ , отрезки, равные  $T$ . В общем виде можем написать:

$$\frac{l}{T} = \tau, \quad \left( \frac{d\vartheta}{dt} \right)_{\tau} = \frac{\vartheta_m}{T} e^{-\tau} = \frac{e^{-\tau} \vartheta_m}{T} = \operatorname{tg} \gamma_{\tau}. \quad (604)$$

Это значит, что длина отрезка прямой  $\vartheta = \vartheta_m$ , заключенного между точкой с произвольной абсциссой  $\tau$  и точкой пересечения этой прямой с касательной, проведенной через точку кривой нагревания с абсциссой  $\tau$ , будет равна  $T$  (фиг. 323).

Вернемся к уравнению кривой нагревания в общем виде, когда начальное значение  $\vartheta_0 \neq 0$ . Тогда мы имели (597):

$$\vartheta = \vartheta_m \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) + \vartheta_0 e^{-\frac{t}{T}}.$$

Можно показать, что кривую, определяемую этим уравнением, можно получить из кривой при  $\vartheta_0 = 0$ , если ее передвинуть на фиг. 324 в сторону отрицательных значений абсцисс до пересечения ее с осью ординат в точке  $(O, \vartheta_0)$ .

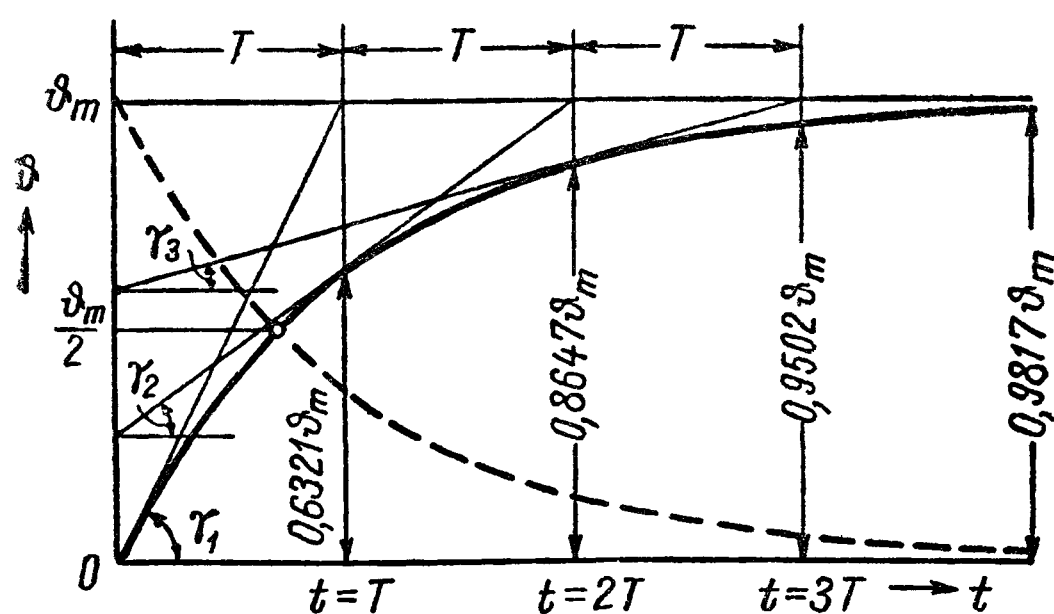
Действительно, если в уравнение (597) подставить

$$t = t' - t_0, \quad \vartheta_0 = \vartheta_m (1 - e^{-\frac{t_0}{T}}), \quad \vartheta = \vartheta_m, \quad (605)$$

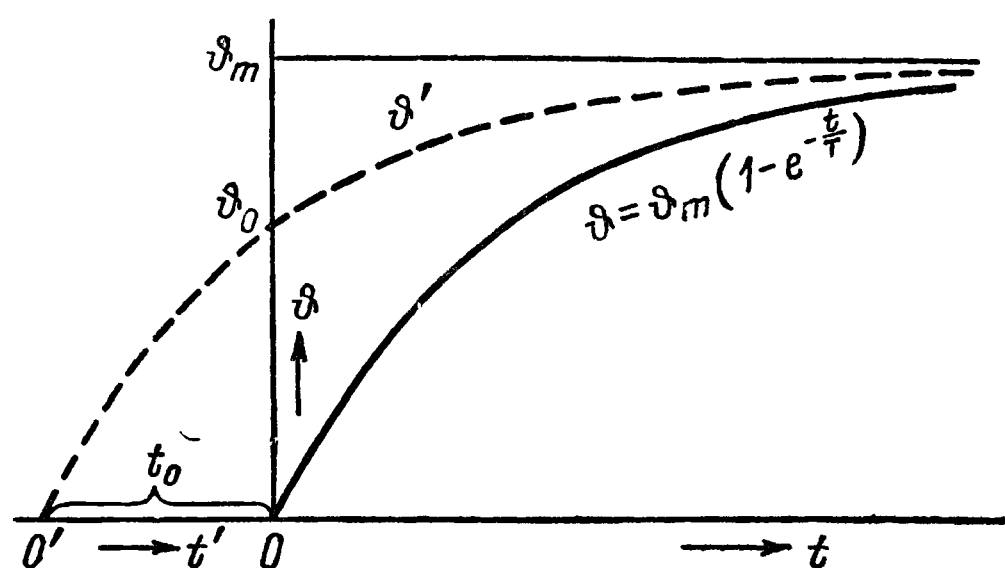
то получим

$$\begin{aligned} \vartheta' &= \vartheta_m (1 - e^{-\frac{t'-t_0}{T}}) + \vartheta_m (1 - e^{-\frac{t_0}{T}}) e^{-\frac{t'-t_0}{T}}, \\ \vartheta' &= \vartheta_m - \vartheta_m e^{-\frac{t'-t_0}{T}} + \vartheta_m e^{-\frac{t'-t_0}{T}} - \vartheta_m e^{-\frac{t'}{T}}, \\ \vartheta' &= \vartheta_m (1 - e^{-\frac{t'}{T}}), \end{aligned} \quad (606)$$

т. е. получаем уравнение, совершенно идентичное с (597а), но кривая начинается в точке  $O'$ .



Фиг. 323. Касательные к кривой нагревания однородного твердого тела



Фиг. 324. Иллюстрация к преобразованию уравнения (597) в (606).

## 254. Процесс остывания идеального однородного твердого тела

Если тело нагрето до температуры, превышающей температуру охлаждающей среды на  $\vartheta_m$ , и предоставлено себе, то оно начнет остывать. Уравнение остывания можно получить из уравнения нагревания (589), положив  $\vartheta = 0$ :

$$-Gcd\vartheta = Sh\vartheta dt. \quad (607)$$

Решая его, получим

$$\begin{aligned} -\frac{Gc}{Sh} d\vartheta &= \vartheta dt; \quad -T d\vartheta = \vartheta dt, \\ \frac{d\vartheta}{\vartheta} &= -\frac{dt}{T}; \end{aligned} \quad (608)$$

$$\ln \vartheta = -\frac{t}{T} + C. \quad (609)$$

Полагая, что в начальный момент  $t = 0$ , имеем  $\vartheta = \vartheta_m$ , тогда

$$\ln \vartheta_m = C. \quad (610)$$

Подставляя это в (609), находим:

$$\begin{aligned} \ln \vartheta &= -\frac{t}{T} + \ln \vartheta_m, \\ \ln \frac{\vartheta}{\vartheta_m} &= -\frac{t}{T}. \end{aligned} \quad (611)$$

Решая относительно  $t$ , а затем относительно  $\vartheta$ , получаем:

$$t = T \ln \frac{\vartheta_m}{\vartheta}, \quad (612)$$

$$\vartheta = \vartheta_m e^{-\frac{t}{T}}. \quad (613)$$

Уравнение (613) и есть уравнение остывания тела, нагретого на  $\vartheta_m$ . Сопоставляем (613) с (597а), перепишем последнее уравнение следующим образом:

$$\vartheta = \vartheta_m (1 - e^{-\frac{t}{T}}), \quad \vartheta_m - \vartheta = \vartheta_m e^{-\frac{t}{T}}, \quad \Delta = \vartheta_m e^{-\frac{t}{T}}. \quad (597б)$$

Здесь

$$\Delta = \vartheta_m - \vartheta \quad (597в)$$

представляет собой, очевидно, отрезки ординат между прямой  $\vartheta = \vartheta_m$  и кривой нагревания. Уравнение (597б) можно назвать уравнением недогрева тела. На фиг. 324 оно выражается той же жирной кривой, если начало координат перенести в точку  $(O, \vartheta_m)$  и направить положительную ось ординат вниз.

Уравнение (597б) совершенно идентично с уравнением остывания (613). Если кривую остывания нанести в тех же координатных осях, что и кривую нагревания тела, то кривая остывания будет представлять собой зеркальное отражение кривой нагревания относительно оси, проведенной через точку  $(O, \vartheta_m/2)$  параллельно оси абсцисс (пунктирная кривая на фиг. 321).

## 255. О некоторых свойствах кривых нагревания и остывания идеального однородного твердого тела

а) Положим в уравнении (597а)

$$\vartheta = \vartheta_1 + \vartheta', \quad t = t_1 + t',$$

тогда уравнение (597а) преобразуется так:

$$\vartheta_1 + \vartheta' = \vartheta_m [1 - e^{-\frac{t_1 + t'}{T}}]$$

$$\vartheta' = \vartheta_m - \vartheta_m e^{-\frac{t_1 + t'}{T}} - \vartheta_1,$$

$$\vartheta' = \vartheta_m - \vartheta_m e^{-\frac{t_1 + t'}{T}} - \vartheta_m (1 - e^{-\frac{t_1}{T}}) = \vartheta_m e^{-\frac{t_1}{T}} (1 - e^{-\frac{t'}{T}}).$$

$$\vartheta' = \vartheta_m' (1 - e^{-\frac{t'}{T}}), \quad (614)$$

где

$$\vartheta_m' = \vartheta_m e^{-\frac{t_1}{T}}.$$

Таким образом, для кривой нагревания с  $\vartheta_m$  и  $\vartheta_0 = 0$  часть ее, начиная с точки  $(t_1, \vartheta_1)$ , представляет опять кривую нагревания с началом в этой точке (на фиг. 325, а обозначена через  $O'$ ) и с  $\vartheta_m' = \vartheta_m - \vartheta_1$ .

Точно так же, если в кривой остывания (613) положим:

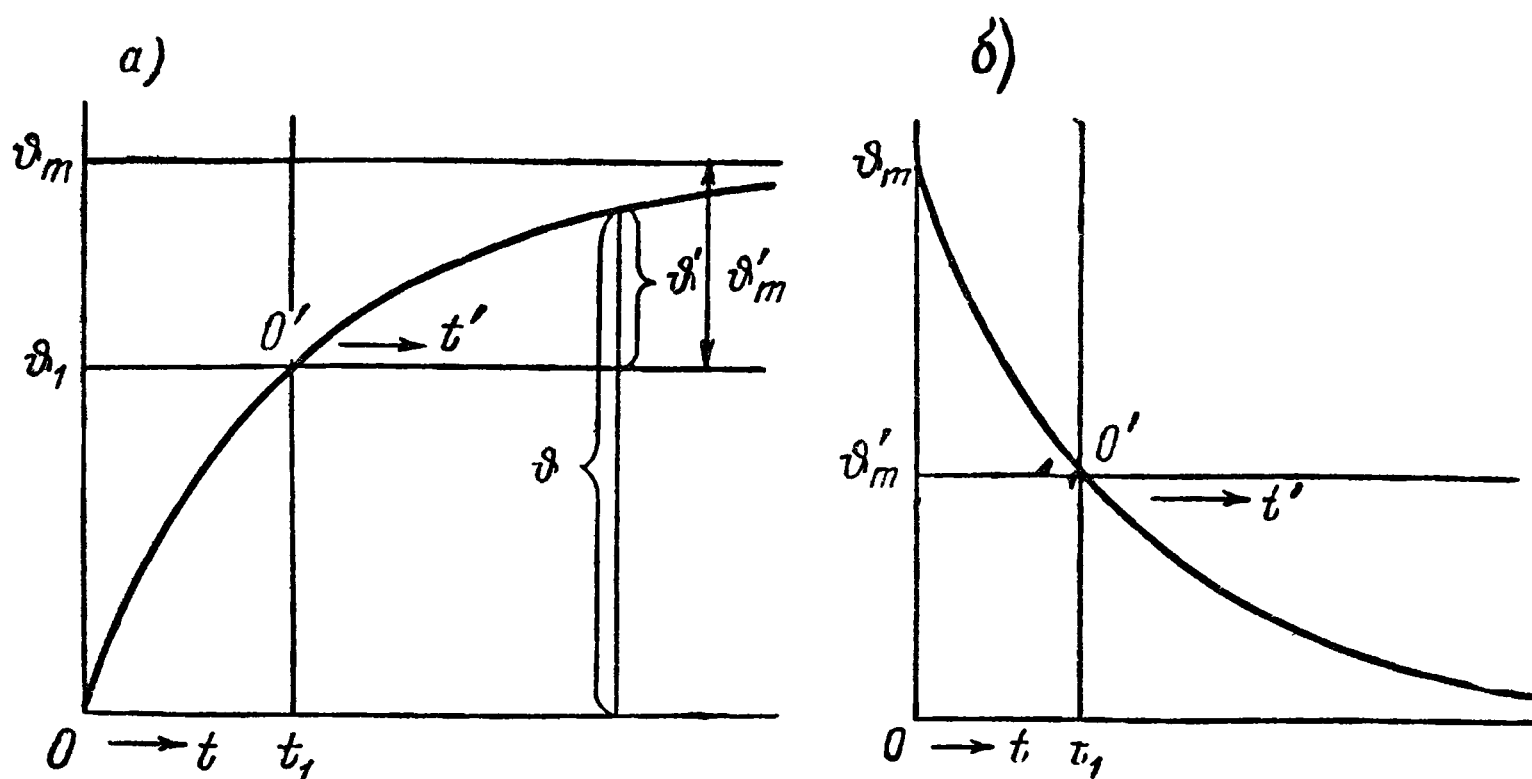
$$t = t_1 + t',$$

то получим:

$$\begin{aligned} \vartheta &= \vartheta_m e^{-\frac{t_1 + t'}{T}} = \vartheta_m e^{-\frac{t_1}{T}} e^{-\frac{t'}{T}}, \\ &= \vartheta'_m e^{-\frac{t'}{T}}, \end{aligned} \quad (615)$$

где

$$\vartheta'_m = \vartheta_m e^{-\frac{t_1}{T}},$$



Фиг 325. Иллюстрация к выяснению некоторых свойств кривых нагревания и остывания идеального однородного твердого тела.

т. е. часть кривой остывания, начиная с точки  $(t_1, \vartheta'_m)$ , представляет собой также кривую остывания, но идущую от начального превышения температуры  $\vartheta'_m$  и имеющую начало координат в точке  $(t_1, \vartheta'_m)$ , на фиг. 325, б обозначена через  $O'$ .

б) Применяя уравнение кривой нагревания тела, решенное относительно  $t$  (596а):

$$t = T \ln \frac{\vartheta_m}{\vartheta_m - \vartheta},$$

к любым двум точкам этой кривой, например к точкам  $(t_1, \vartheta_1)$  и  $(t_2, \vartheta_2)$ , получаем.

$$t_1 = T \ln \left( \frac{\vartheta_m}{\vartheta_m - \vartheta_1} \right); \quad t_2 = T \ln \left( \frac{\vartheta_m}{\vartheta_m - \vartheta_2} \right).$$

Деля второе уравнение на первое, имеем:

$$\frac{t_2}{t_1} = \frac{\ln \left( \frac{\vartheta_m}{\vartheta_m - \vartheta_2} \right)}{\ln \left( \frac{\vartheta_m}{\vartheta_m - \vartheta_1} \right)},$$

откуда

$$\frac{t_2 - t_1}{t_1} = \frac{\ln \left( \frac{\vartheta_m}{\vartheta_m - \vartheta_2} \right) - \ln \left( \frac{\vartheta_m}{\vartheta_m - \vartheta_1} \right)}{\ln \left( \frac{\vartheta_m}{\vartheta_m - \vartheta_1} \right)} = \frac{\ln \left( \frac{\vartheta_m - \vartheta_1}{\vartheta_m - \vartheta_2} \right)}{\ln \left( \frac{\vartheta_m}{\vartheta_m - \vartheta_1} \right)}. \quad (616)$$



Если выбрать  $t_2$  и  $t_1$  таким образом, чтобы было  $t_2 = 2t_1$ , то

$$\frac{t_2 - t_1}{t_1} = \frac{2t_1 - t_1}{t_1} = 1,$$

а поэтому из (616) получим.

$$\ln \left( \frac{\vartheta_m}{\vartheta_m - \vartheta_1} \right) = \ln \left( \frac{\vartheta_m - \vartheta_1}{\vartheta_m - \vartheta_2} \right),$$

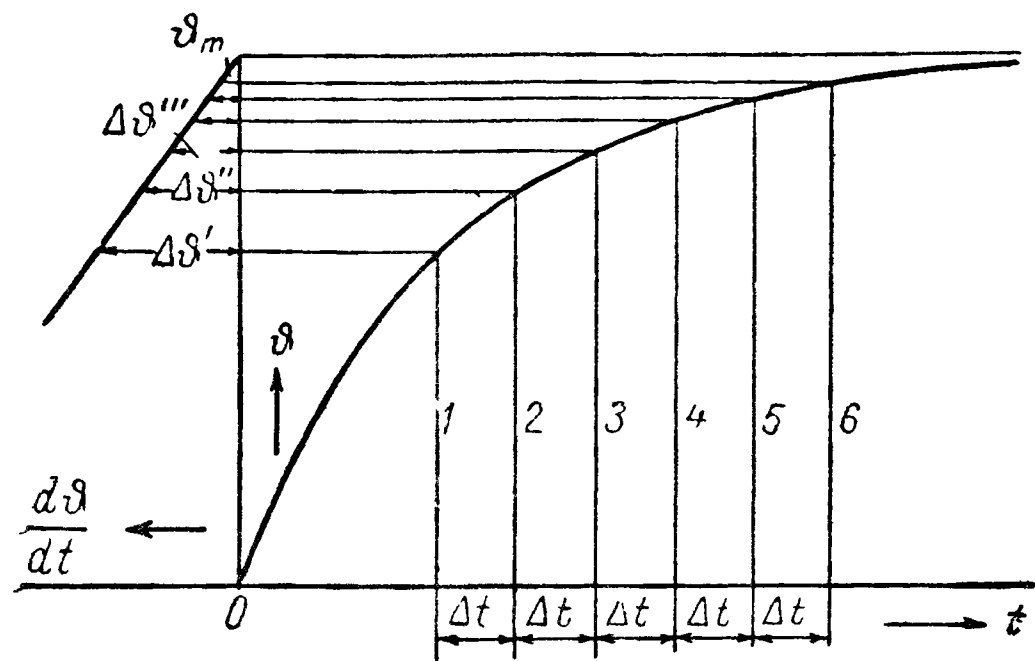
откуда

$$\frac{\vartheta_m}{\vartheta_m - \vartheta_1} = \frac{\vartheta_m - \vartheta_1}{\vartheta_m - \vartheta_2}.$$

Решая это уравнение относительно  $\vartheta_m$ , получаем

$$\vartheta_m = \frac{\vartheta_1^2}{2\vartheta_1 - \vartheta_2}. \tag{617}$$

Пользуясь этим выражением, можно определить конечное превышение температуры  $\vartheta_m$ , если из опыта известны два значения  $\vartheta$ , измеренные для



Фиг. 326. Графический способ определения конечного значения температуры отдельной части эл. машины

двух моментов времени, находящихся в отношении 1 : 2. Опытное снятие всей кривой нагрева является, таким образом, излишним. Однако нужно отметить, что незначительная ошибка в отчетах  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$  сказывается на результате по формуле (617) весьма существенно, так как в знаменателе этой формулы мы имеем разность отчетов. Ввиду этого при пользовании формулой (617) следует брать такие точки кривой нагревания, чтобы  $\vartheta_2$  было равно примерно 0,75  $\vartheta_m$ .

в) Проще и надежнее можно найти  $\vartheta_m$  графически следующим способом, не снимая всей кривой нагревания. Предположим, что опытным путем снят участок кривой нагревания, находящийся в верхней пологой части (фиг. 326). Поступаем следующим образом: проводим на равных небольших расстояниях друг от друга ряд ординат, обозначим эти расстояния через  $\Delta t$ , а получаемые приращения температуры через  $\Delta \vartheta'$ ,  $\Delta \vartheta''$ ,  $\Delta \vartheta'''$  и т. д. Принимаем, что

для ординаты 1 отношение

$\frac{d\vartheta}{dt} = \frac{\Delta \vartheta'}{\Delta t},$

»       »       2       »

$\frac{d\vartheta}{dt} = \frac{\Delta \vartheta''}{\Delta t},$

»       »       3       »

$\frac{d\vartheta}{dt} = \frac{\Delta \vartheta'''}{\Delta t},$

.....

$\left. \vphantom{\begin{matrix} \frac{d\vartheta}{dt} = \frac{\Delta \vartheta'}{\Delta t} \\ \frac{d\vartheta}{dt} = \frac{\Delta \vartheta''}{\Delta t} \\ \frac{d\vartheta}{dt} = \frac{\Delta \vartheta'''}{\Delta t} \end{matrix}} \right\} \tag{618}$

Так как знаменатели у нас во всех дробях (618) одни и те же, то мы можем влево от оси ординат откладывать просто  $\Delta \vartheta'$ ,  $\Delta \vartheta''$ ,  $\Delta \vartheta'''$  и т. д. и построить, как указано на фиг. 326, участок прямой, выражаемый уравнением, вытекающим из (608).

$$\vartheta = f \left( \frac{d\vartheta}{dt} \right).$$

Продолжив прямую до пересечения с осью ординат, находим  $\vartheta_m$ .

## 256. Другие виды уравнения нагревания идеального однородного твердого тела

а) Уравнению нагревания идеального однородного твердого тела (597а) можно придать несколько иной вид, если произвести преобразование:

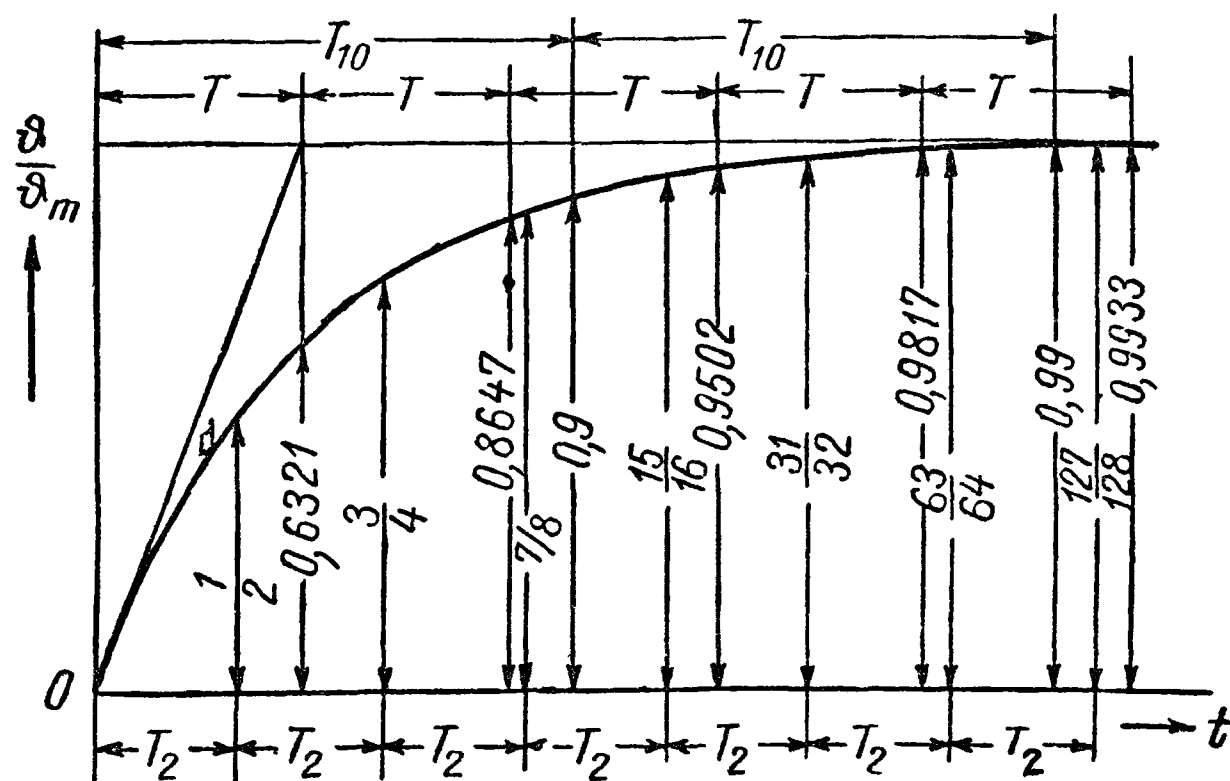
$$e^{-\frac{t}{T}} = e^{0,69315 \times \frac{-t}{0,69315 T}} = 2^{-\frac{t}{0,69315 T}} = 2^{-\frac{t}{T_2}}. \quad (619)$$

Здесь

$$e^{0,69315} = 2; T_2 = 0,69315 T. \quad (620)$$

Подставляя (619) в (597а), получим:

$$\vartheta = \vartheta_m (1 - 2^{-\frac{t}{T_2}}). \quad (621)$$



Фиг. 327. Построение кривой нагревания по показательной ( $T$ ), бинарной ( $T_2$ ) и десятичной ( $T_{10}$ ) постоянным времени

Постоянную времени  $T_2$  называют бинарной постоянной времени в отличие от ранее выведенной постоянной  $T$ ; последнюю можно назвать показательной постоянной времени.

Бинарная постоянная времени  $T_2$  составляет, как видно из (620), около 70% от показательной постоянной времени  $T$ . При пользовании бинарной постоянной времени, беря отношение  $\frac{t}{T_2}$  равным целым числам, можно вычерчивание кривой нагрева произвести крайне просто. В самом деле,

$$\text{если } t = T_2, \text{ то } \vartheta = \vartheta_m (1 - 2^{-1}) = \vartheta_m (1 - \frac{1}{2}) = \frac{1}{2} \vartheta_m;$$

$$\text{» } t = 2T_2, \text{ » } \vartheta = \vartheta_m (1 - 2^{-2}) = \vartheta_m (1 - \frac{1}{4}) = \frac{3}{4} \vartheta_m;$$

$$\text{» } t = 3T_2, \text{ » } \vartheta = \vartheta_m (1 - 2^{-3}) = \vartheta_m (1 - \frac{1}{8}) = \frac{7}{8} \vartheta_m;$$

$$\text{» } t = 4T_2, \text{ » } \vartheta = \vartheta_m (1 - 2^{-4}) = \vartheta_m (1 - \frac{1}{16}) = \frac{15}{16} \vartheta_m \text{ и т. д.}$$

Построение выполнено на фиг. 327.

б) Выражение  $e^{-\frac{t}{T}}$  можно преобразовать еще другим удобным способом, учтя, что

$$e^{-\frac{t}{T}} = e^{2,3026 \frac{-t}{2,3026 T}} = 10^{-\frac{t}{T_{10}}}, \quad (622)$$

где

$$e^{2,3026} = 10, T_{10} = 2,3026 T. \quad (623)$$

Пользуясь этими значениями, можем переписать уравнение (597а) так:

$$\vartheta = \vartheta_m (1 - 10^{-\frac{t}{T_{10}}}). \quad (624)$$

Постоянную времени  $T_{10}$  называют десятичной постоянной времени; она в 2,3 раза больше показательной постоянной времени.

Из уравнения (624) получаем:

$$\begin{aligned} \text{для } t = T_{10}; \quad \vartheta &= \vartheta_m (1 - 10^{-1}) = 0,9\vartheta_m; \\ \text{» } t = 2T_{10}; \quad \vartheta &= \vartheta_m (1 - 10^{-2}) = 0,99\vartheta_m; \\ \text{» } t = 3T_{10}; \quad \vartheta &= \vartheta_m (1 - 10^{-3}) = 0,999\vartheta_m \text{ и т. д.} \end{aligned}$$

Построение выполнено также на фиг. 327.

Если по оси абсцисс откладывать отношения  $\frac{t}{T}$ ,  $\frac{t}{T_2}$ ,  $\frac{t}{T_{10}}$ , а по оси ординат десятичный логарифм отношения  $\vartheta/\vartheta_m$ , т. е.  $\lg(\vartheta/\vartheta_m)$ , то для всех трех уравнений:

$$\vartheta = \vartheta_m (1 - e^{-\frac{t}{T}}); \quad \vartheta = \vartheta_m (1 - 2^{-\frac{t}{T_2}}); \quad \vartheta = \vartheta_m (1 - 10^{-\frac{t}{T_{10}}})$$

получим прямые, наклоненные к оси абсцисс под разными углами.

## 257. О применении предыдущих выводов к нагреванию эл. машин

В предыдущих параграфах данного раздела мы имели дело с нагреванием идеального однородного твердого тела. Переходя к эл. машинам, мы должны рассматривать отдельно нагревание следующих ее частей: якоря, катушек полюсов и коллектора, так как количество тепла, выделяющегося в каждой из этих частей, а также условия для рассеяния тепла для каждой части будут различны.

Закон, выведенный для нагревания идеального однородного твердого тела в функции от времени, оказывается в общем приложимым и к перечисленным частям эл. машины, но нуждается в некоторых оговорках и пояснениях так как некоторые предпосылки, которые мы сделали выше при рассмотрении проблемы, здесь полностью не осуществляются.

а) Влияние зависимости потерь в якоре от температуры. В якоре мы имеем потери на гистерезис и вихревые токи в сердечнике и зубцах якоря и потери от эл. сопротивления и потери на вихревые токи в проводниках обмотки.

Потери на гистерезис и вихревые токи в сердечнике якоря и зубцах зависят от температуры мало, и их мы будем считать поэтому неизменными; также будем считать не зависящими от температуры потери на вихревые токи в обмотке якоря, но потери от эл. сопротивления обмотки с ростом температуры возрастают, вследствие возрастания эл. сопротивления самой обмотки. Так как эл. сопротивление обмотки растет в зависимости от температуры по прямолинейному закону, то количество тепла, выделяющееся в якоре в единицу времени, можно представить так:

$$Q = Q_0 (1 + \alpha\vartheta).$$

Подставляя это выражение в (589), получим:

$$Q_0 (1 + \alpha\vartheta) dt - Sh\vartheta dt = Gcd\vartheta$$

Решая это уравнение, находим:

$$\begin{aligned} [Q_0 - (Sh - Q_0\alpha)\vartheta] dt &= Gcd\vartheta, \\ \left[ \frac{Q_0}{Sh - Q_0\alpha} - \vartheta \right] dt &= \frac{Gcd\vartheta}{Sh - Q_0\alpha} d\vartheta. \end{aligned} \quad (625)$$

Введем обозначения:

$$\vartheta'_m = \frac{Q_0}{Sh - Q_0\alpha}, \quad T' = \frac{Gc}{Sh - Q_0\alpha}. \quad (626)$$

Тогда уравнение (625) переписется так:

$$(\vartheta'_m - \vartheta) dt = T' d\vartheta, \\ \frac{d\vartheta}{\vartheta'_m - \vartheta} = \frac{dt}{T'}. \quad (627)$$

По виду это уравнение совпадает с уравнением (593), полученным нами выше для идеального однородного твердого тела при условии, что количество тепла, выделяющегося в единицу времени, остается неизменным. Следовательно, и повышение температуры в функции времени будет происходить по тому же закону.

Сопоставляя же (626) с аналогичными выражениями (591) и (602) для идеального однородного твердого тела:

$$\vartheta_m = \frac{Q}{Sh} \text{ и } T = \frac{Gc}{Sh},$$

видим, что зависимость потерь от температуры ведет к увеличению предельной достигаемой телом (эл. машиной) температуры и к увеличению постоянной времени нагревания тела.

**б) Влияние других факторов.** При рассмотрении нагревания идеального однородного твердого тела мы считали, что рассеяние тепла ( $h$ ) не зависит от температуры; между тем, в эл. машине с ростом температуры  $h$  возрастает. Поэтому в начале процесса мы имеем несколько большую постоянную времени нагревания тела, чем при установившемся тепловом состоянии. Вначале температура повышается несколько медленнее, чем то следует по кривой, построенной по конечному значению  $T$ . Такое же влияние на действительный процесс нагревания эл. машины оказывает и теплопроводность внутренних слоев отдельных частей эл. машины, принятая нами выше бесконечно большой. На самом деле теплота доходит до наружной поверхности лишь спустя некоторое время, вследствие чего кривая нагревания вначале должна расти медленнее. По этой причине, если построить по опытным данным кривую  $\vartheta = f(t)$ , то для моментов времени, близких к начальным, мы фактически не получим прямой линии.

Однако в большинстве практических случаев интерес представляет лишь верхняя часть кривой нагревания, а в этой части кривой температура наружной поверхности растет почти пропорционально температуре внутренних частей, причем  $h$  и  $c$  практически можно считать постоянными.

Отметим также, что, говоря об охлаждении эл. машины, нужно помнить, что рассеяние тепла  $h$  зависит от скорости ее вращения. Поэтому, если во время охлаждения эл. машина стоит, то постоянная времени охлаждения машины получит большие значения, чем для кривой нагревания машины, как это явствует из формулы (602):

$$T = \frac{Gc}{Sh}.$$

Вследствие сказанного кривая охлаждения стоящей машины не будет зеркальным отражением кривой нагревания эл. машины, что нужно учитывать при решении рассматриваемых ниже проблем нагревания эл. машин при разных режимах работы.

## Г. ПРОЦЕССЫ НАГРЕВАНИЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 258. Подразделение режимов работы машин постоянного тока

Практические режимы работы эл. машин весьма разнообразны, поэтому было признано целесообразным для производства машин сводить режимы работы к одному из следующих трех номинальных режимов работы.

1) Продолжительный номинальный режим работы эл. машины — режим работы, при котором скорость вращения и нагрузка остаются неизменными и равными номинальным, а рабочий период настолько продолжителен, что температуры отдельных частей машины практически достигают конечных значений, соответствующих выделяемым в машине потерям.

2) Кратковременный номинальный режим работы эл. машины — режим работы, при котором скорость вращения и нагрузка остаются неизменными и равными номинальным, но продолжительность работы не настолько длительна, чтобы температуры отдельных частей машины могли достигнуть тех конечных значений, которые получились при продолжительном режиме работы, период же покоя машины или работы без нагрузки длится настолько долго, что машина достигает практически холодного состояния.

3) Повторно-кратковременный номинальный режим работы эл. машины — режим работы, при котором скорость вращения и кратковременная нагрузка остаются неизменными и номинальными и чередуются с периодами работы без нагрузки, при этом такая работа длится столько времени, что температуры отдельных частей машины успевают достигнуть своих конечных значений, соответствующих выделяемым потерям.

При всех трех номинальных режимах работы температуры отдельных частей машины не должны выходить за те, которые признаются для них стандартом допустимыми с точки зрения сохранения машины в состоянии, годном для работы в течение приемлемого срока службы.

### 259. Нагревание эл. машины при продолжительном номинальном режиме работы

Хотя предпосылки, положенные при выводе закона изменения  $\vartheta$  во времени, здесь полностью не осуществляются, однако в части кривой  $\vartheta = f(t)$ , представляющей наибольший интерес, он в общем приложим с теми оговорками, которые были сделаны в § 257, это позволяет определить  $\vartheta_m$  и  $T$  при опытной исследовании эл. машины, пользуясь верхней частью кривой  $\vartheta = f(t)$  (см. § 255 и 253).

### 260. Нагревание эл. машины при кратковременном номинальном режиме работы

Заставляя эл. машины работать продолжительно при разных нагрузках, т. е. при разных потерях, например  $Q_1, Q_2, Q_3$  и т. д., мы получим ряд кривых нагревания, построенных на фиг. 328. У всех этих кривых разные предельные достигаемые температуры  $\vartheta_m$ , так как они зависят от потерь:

$$\vartheta_m = \frac{Q}{Sh},$$

но одинаковые  $T$ , так как  $T$  не зависит от  $Q$ :

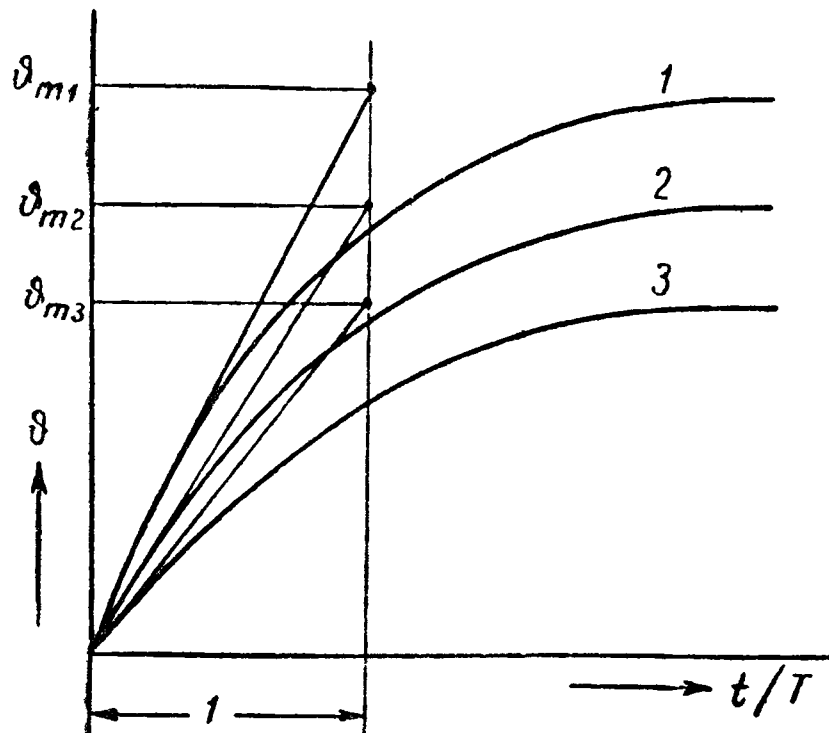
$$T = \frac{Gc}{Sh}.$$



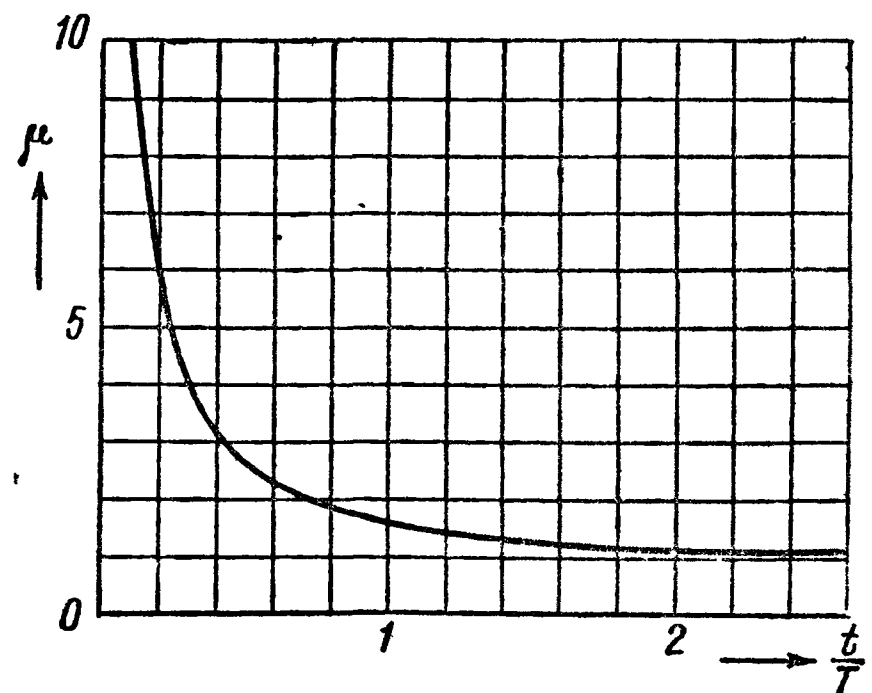
Если кривая 1 на фиг. 328, полученная при  $Q_1$ , представляет кривую нагревания эл. машины при номинальной мощности, то  $\vartheta_{m1}$  будет предельным допустимым для эл. машины превышением температуры. Тогда при больших значениях  $Q > Q_1$  машина не сможет работать продолжительно, т. е. сколько угодно долгое время, а только время, соответствующее пересечению кривых нагревания с горизонтальной прямой  $\vartheta_{m1}$ , т. е. время  $\tau_2$ ,  $\tau_3$  и т. д.

Обозначая отношение потерь при любой нагрузке к номинальным потерям через

$$\mu = Q_x / Q_1, \quad (628)$$



Фиг. 328. Кривые нагревания тела до разных температур



Фиг. 329. Зависимость  $\mu = f(t/T)$  для определения допустимой мощности электродвигателя при разных кратковременных нагрузках

можем написать

$$\vartheta = \vartheta_{mx} (1 - e^{-\frac{t}{T}}), \quad (629)$$

где

$$\vartheta_{mx} = \frac{Q_x}{Sh}. \quad (630)$$

Очевидно, что

$$\mu = Q_x / Q_1 = \vartheta_{mx} / \vartheta_{m1} > 1.$$

Тогда (629) можно представить в таком виде:

$$\vartheta = \vartheta_{mx} (1 - e^{-\frac{t}{T}}) = \mu \vartheta_{m1} (1 - e^{-\frac{t}{T}}). \quad (631)$$

Так как  $\mu > 1$ , то  $\mu \vartheta_{m1}$  для машины недопустимо, и нагревание машины можно вести только до тех пор, пока  $\vartheta$  не сделается равным  $\vartheta_{m1}$ ; поэтому вместо (631) можем написать:

$$\vartheta_{m1} = \mu \vartheta_{m1} (1 - e^{-\frac{t}{T}}),$$

откуда получаем по сокращении на  $\vartheta_{m1}$ :

$$1 = \mu (1 - e^{-\frac{t}{T}}),$$

$$\mu = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t}{T}}} = \frac{e^{\frac{t}{T}}}{e^{\frac{t}{T}} - 1}. \quad (632)$$

Это выражение ограничивает время, в течение которого машина может работать при данных, повышенных в  $\mu$  раз потерях  $Q_x$ .

Придавая  $\mu$  в (632) ряд значений, превышающих единицу, получим кривую, представленную на фиг. 329 — связь  $\mu$  с отношением  $t/T$ , где  $t$  — время возможной работы при данном  $\mu$

### 261. Нагревание эл. машины при повторно-кратковременном режиме работы

На фиг. 330 показана кривая нагревания  $m$  какой-либо части машины при продолжительном номинальном режиме работы с потерями мощности  $Q_x$ . Кривая  $n$  дает остывание машины, нагретой до установившегося превышения температуры  $\vartheta_m$  при работе без нагрузки.

Рассмотрим теперь работу машины согласно графику (фиг. 330), т. е. когда период нагрузки длится всего  $a$  секунд, а затем следует период  $b$  секунд без нагрузки, затем опять  $a$  секунд нагрузки,  $b$  — без нагрузки и т. д. Спрашивается, как будет происходить изменение превышения температуры во времени? Начнем с момента времени, когда машина холодная, и заставим ее работать  $a$  секунд. Очевидно, что интересующая нас часть машины нагреется по кривой  $m$  до значения, соответствующего времени  $a$ . В этот момент времени нагрузка выключается, и тело начинает остывать. Остывание будет идти по кривой охлаждения  $n$  в течение  $b$  секунд по участку кривой 1—2, который мы получим, передвинув на фигуре кривую  $n$  влево до пересечения в точке 1 с кривой нагревания  $m$ . Точка 2 даст нам температуру тела в конце  $b$  секунд. При следующей работе  $a$  секунд тело будет нагреваться, и  $\vartheta$  будет расти по кривой 2—3, если кривую  $m$  передвинем вправо до точки 2. Продолжая построение кривой нагревания тела по тому же методу, мы получим пилообразную кривую, которая и даст изменение во времени превышения температуры над температурой окружающей среды. Установившимся состоянием мы можем назвать такое, когда повышение температуры за время  $a$  секунд будет равняться понижению ее за время  $b$  секунд. Применяя к кривой нагревания формулу (595):

$$t = T \ln [(\vartheta_m - \vartheta_0)/(\vartheta_m - \vartheta)],$$

нужно положить

$$t = a, \quad \vartheta_0 = \vartheta'_{\min}, \quad \vartheta' = \vartheta_{\max},$$

получим:

$$a = T \ln \frac{\vartheta_m - \vartheta'_{\min}}{\vartheta_m - \vartheta'_{\max}} \quad \text{или} \quad e^{\frac{a}{T}} = \frac{\vartheta_m - \vartheta'_{\min}}{\vartheta_m - \vartheta'_{\max}}. \quad (633)$$

Для кривой охлаждения, применяя формулу (612):  $t = T \ln (\vartheta_m / \vartheta)$  и положив в ней  $t = b$ ,  $\vartheta_m = \vartheta'_{\max}$ ,  $\vartheta = \vartheta'_{\min}$ , получим:

$$b = T \ln (\vartheta'_{\max} / \vartheta'_{\min}) \quad \text{или} \quad e^{\frac{b}{T}} = \vartheta'_{\max} / \vartheta'_{\min}. \quad (634)$$

Исключив из уравнений (633) и (634)  $\vartheta'_{\min}$ , получим:

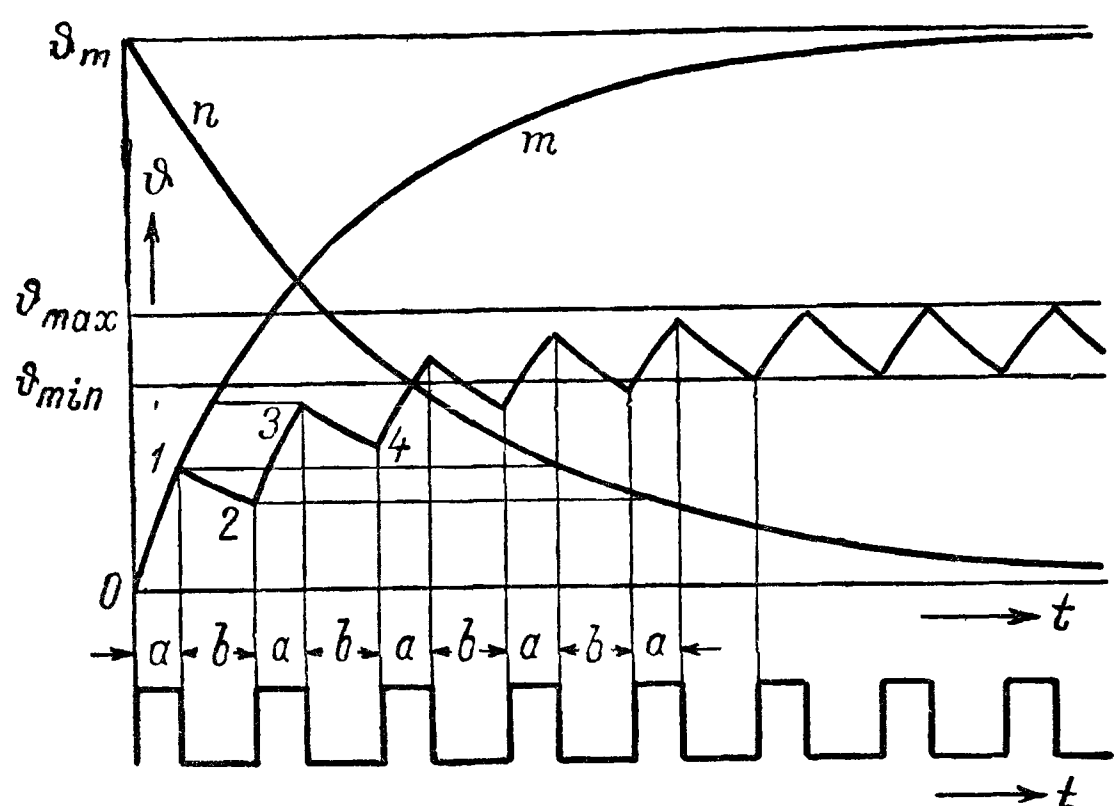
$$\vartheta'_{\max} = \frac{e^{\frac{a}{T}} - 1}{e^{\frac{a}{T}} - e^{\frac{b}{T}}} \vartheta_m. \quad (635)$$

Так как в этом выражении первый множитель в правой части меньше единицы, то  $\vartheta'_{\max} < \vartheta_m$ . Следовательно, при повторно-кратковременной работе можно допустить в машине большие потери  $Q_x$  во столько раз, во сколько раз  $\vartheta_m$  больше  $\vartheta'_{\max}$ . Вводя обозначения:

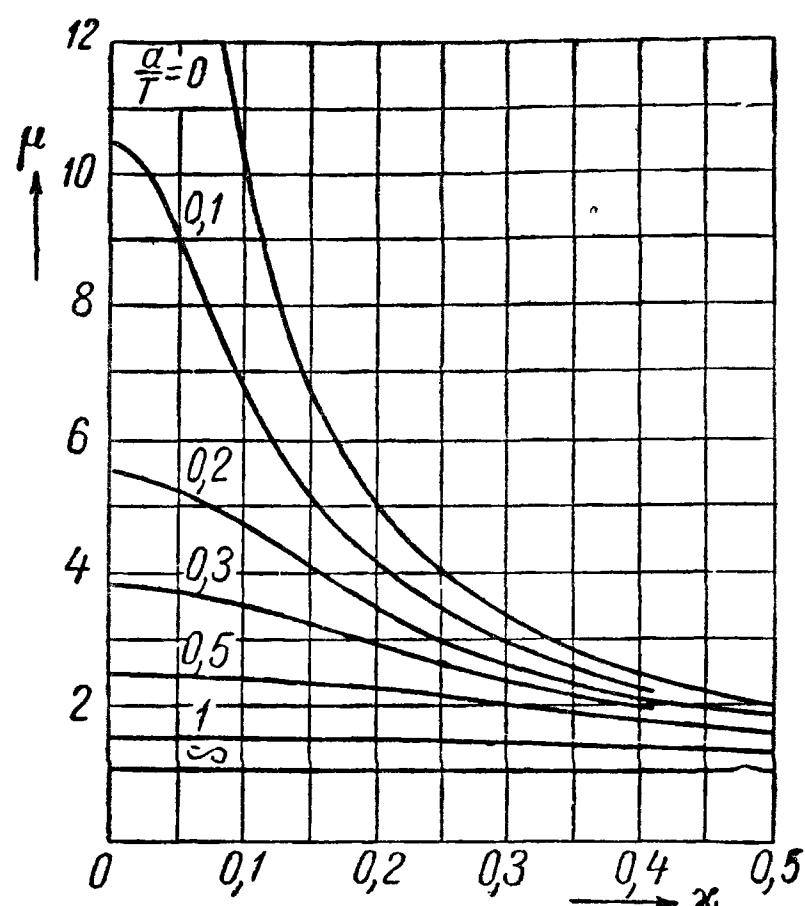
$$\mu = \vartheta_m / \vartheta'_{\max}$$

и пользуясь этим соотношением, можем (635) написать так:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{e^{\frac{a}{T}} - 1}{e^{\frac{a}{T}} - e^{-\frac{b}{T}}} \quad \text{или} \quad \mu = \frac{e^{\frac{a}{T}} - e^{-\frac{b}{T}}}{e^{\frac{a}{T}} - 1}. \quad (636)$$



Фиг. 330. Графическое определение повышения температуры при повторно-кратковременной нагрузке.



Фиг. 331. Зависимость  $\mu = f(\kappa)$  для разных  $a/T$  при повторно-кратковременной нагрузке.

При  $b = \infty$  это уравнение переходит в уравнение (632) для кратковременной нагрузки, выведенное нами раньше:

$$\mu = \frac{1}{1 - e^{-\frac{a}{T}}}.$$

Введем обозначение

$$\kappa = \frac{a}{a+b} = \frac{a}{\tau}, \quad (637)$$

где  $\kappa$  является относительной продолжительностью включения, а  $\tau$  — полным циклом работы. На фиг. 331 приведены кривые  $\mu$  в функции от  $\kappa$  для разных отношений  $a/T$ .

Если при выключении из работы машина останавливается, то тогда  $T_b > T_a$ , а не равно ему. В этом случае все наши рассуждения остаются теми же, но вместо (636) получим:

$$\mu = \frac{e^{\frac{a}{T_a}} - e^{-\frac{b}{T_b}}}{e^{\frac{a}{T_a}} - 1}. \quad (636a)$$

Для относительной длительности тогда получим вместо (637) выражение.

$$\kappa = \frac{a}{a + b \frac{T_a}{T_b}} \quad (638)$$

и

$$\mu = \frac{1 - e^{-\frac{1}{\kappa} \frac{a}{T_a}}}{1 - e^{-\frac{a}{T_a}}}. \quad (639)$$

Фиг. 331 в этом случае сохраняется.

## 262. Вычисление превышения температур отдельных частей эл. машины

**а) Катушки магнитных полюсов.** Катушки полюсов не являются однородным телом, имеющим во всех направлениях одинаковую теплопроводность. Кроме того, рассеяние тепла для разных частей катушек оказывается неодинаковым. Нагревание катушек происходит за счет энергии, теряемой в эл. сопротивлении их обмотки энергии, теряемой в полюсных башмаках из-за пульсации магнитного потока вследствие зубчатости якоря, а также вследствие лучеиспускания якоря.

Исследования превышения температуры в разных местах полюсных катушек показали, что оно в них не всюду одинаково. Наибольшего значения превышение температуры достигает внутри катушки, что должно учитываться при пользовании методом термометра; метод сопротивления дает разницу между измеренным значением превышения температуры и максимальным, примерно, на  $5^\circ \text{C}$  меньше.

Для определения при расчете машины постоянного тока допустимого конечного превышения температуры катушек пользуются формулой (591):  $\vartheta_m = Q/Sh$ . Так как потери мощности мы вычисляем в ваттах, то и  $h$  нужно брать в  $\text{дж/см}^2 \cdot \text{сек} \cdot \text{град}$ . Тогда  $\vartheta_m$  будем получать в  $^\circ \text{C}$ .

Выражение для  $\vartheta_m$  можно представить в таком виде:

$$\vartheta_m = \frac{1}{S/Q} \cdot \frac{1}{h} = \frac{C_m}{a_m}, \quad (640)$$

где

$$a_m = \frac{S}{Q} \quad \text{и} \quad C_m = \frac{1}{h}. \quad (641)$$

Значение  $C_m$  зависит от сорта и толщины изоляции витков катушки, конструкции самих катушек и машины и от степени нагрева катушек.

Для  $C_m$  по Арнольду имеем:

для совершенно открытых машин . . . . .	$C_m = 450 \div 550$
» машин с подшипниковыми щитами . . . . .	$C_m = 550 \div 650$
» полузакрытых машин . . . . .	$C_m = 650 \div 750$

Чем лучше вентилируется якорь, тем меньшее значение имеет  $C_m$ . Приведенные значения  $C_m$  являются средними и могут служить лишь для приближенного суждения об ожидаемом превышении температур.

Охлаждающая поверхность  $S$  при длинных катушках подсчитывается по фиг. 332, а, при коротких и толстых катушках — согласно фиг. 332, б.

Для создания лучшего охлаждения катушек часть их разбивают на части (фиг. 333), удерживаемые друг от друга на определенных расстояниях деревянными прокладками. За теплорассеивающую поверхность в этом случае можно принять поверхность, указанную на фиг. 333 пунктиром.

Для катушек добавочных полюсов (фиг. 334) можно написать аналогичную формулу

$$\vartheta_w = C_w/a_w, \quad (642)$$

где  $C_w$  и  $a_w$  обозначают аналогичные величины. На фиг. 334 показано, как вычислять  $S_w$ . Что касается  $C_w$ , то он, примерно, в 2 раза меньше  $C_m$ :

$$C_w \approx \frac{1}{2} C_m, \quad (643)$$

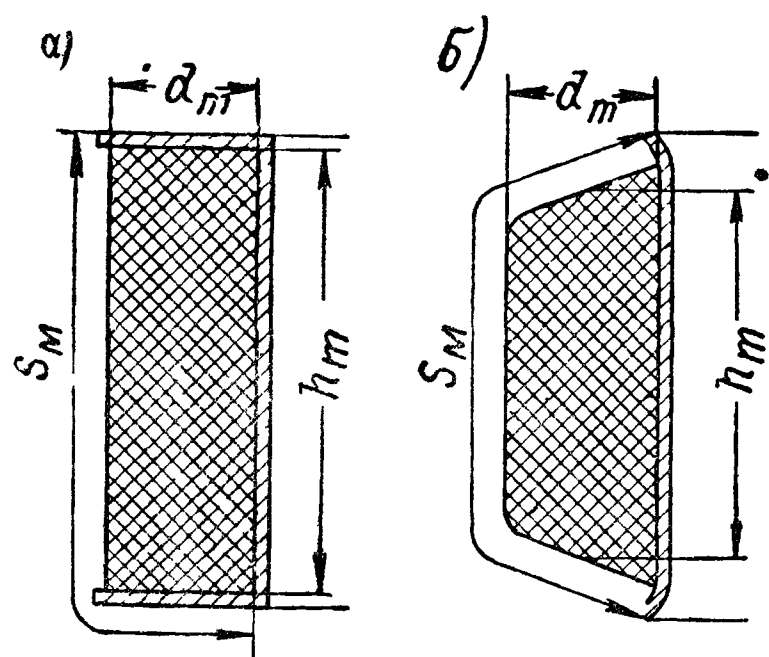
так как катушки добавочных полюсов обычно тонкие и содержат мало изоляции.

б) **Якорь.** Сильнее всего нагревается наружный рабочий слой, где в пазах лежат катушки якорной обмотки. Согласно вышесказанному, формуле для превышения температуры якоря можно придать такой вид

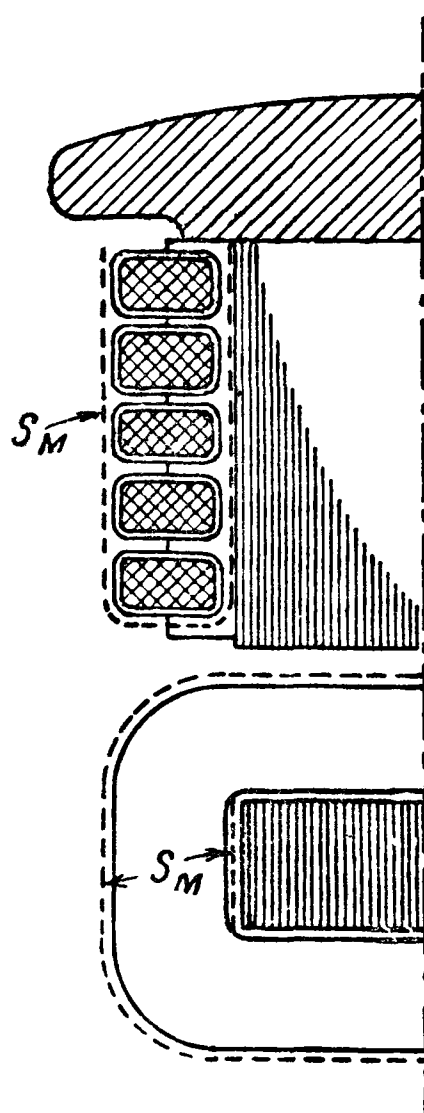
$$\vartheta_A = C_A/a_A. \quad (644)$$

Для  $C_A$  Арнольд дает такую формулу:

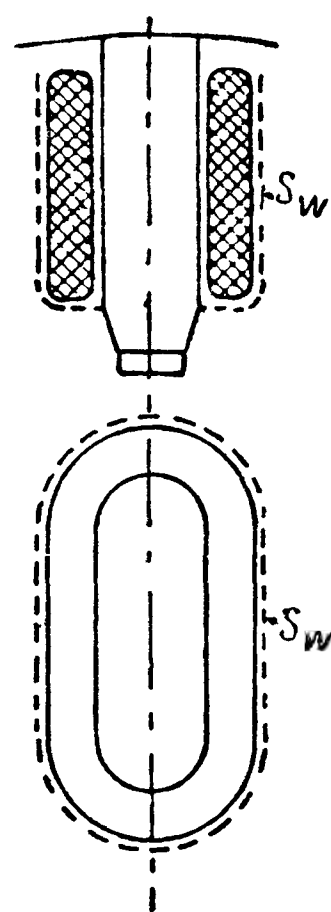
$$C_A = 450 \div 550 \quad (645)$$



Фиг. 332 К определению охлаждающей поверхности длинных (а) и коротких и толстых (б) полюсных катушек



Фиг. 333. К определению охлаждающей поверхности подразделенной полюсной катушки



Фиг. 334. К определению охлаждающей поверхности катушек добавочных полюсов

Для совершенно открытых машин с отдельными подшипниками, по Арнольду,

$$C_A = 350 \div 425. \quad (645a)$$

Для вычисления  $S_A$  в случае, если диаметр якоря  $D_a < 40$  см (фиг. 335), можно пользоваться формулой:

$$S_A = \pi D_a (l_{\Sigma} + 2l_{st}) + \pi D_i l_{\Sigma} + \frac{\pi}{4} (D_a^2 - D_i^2) (2 + n_v), \quad (646)$$

здесь  $n_v$  — число радиальных вентиляционных каналов,  $l_{st}$  — длина, на которую выступают лобовые соединения якоря. На фиг. 335 пунктиром показана та поверхность, которая учтена как охлаждающая.

Для машин с  $D_a > 40$  см,  $S_A$  следует учитывать по следующей формуле (фиг. 336):

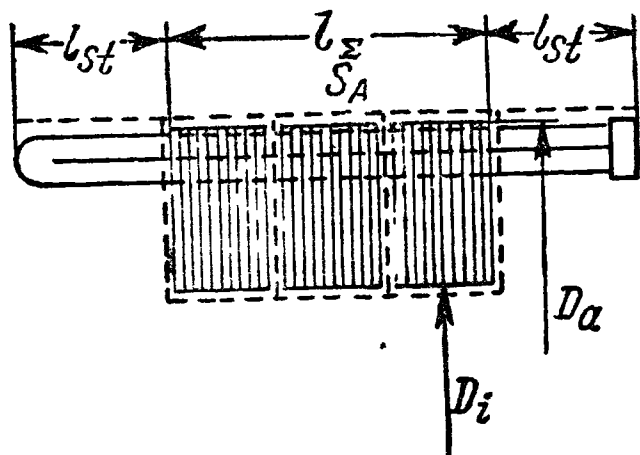
$$S_A = \pi D_a (l_{\Sigma} + 4l_{st}) + \pi D_i l_{\Sigma} + \frac{\pi}{4} (D_a^2 - D_i^2) (2 + n_v). \quad (646a)$$



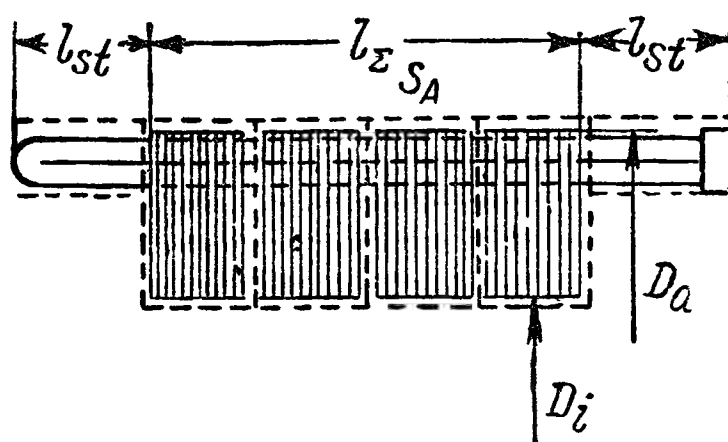
в) Коллектор. Вычисление  $\vartheta_k$  нужно делать по формуле:

$$\vartheta_k = C_k/a_k = (70 \div 120)/a_k. \quad (647)$$

Чем лучше омывается воздухом внутренняя и наружная поверхность, тем меньше  $C_k$ . Для улучшения охлаждения коллектора, если в этом имеется необходимость, можно рекомендовать делать петушки из тонкой широкой



Фиг. 335 К определению охлаждающей поверхности якорей с диаметром  $D_a < 40$  см.



Фиг. 336. К определению охлаждающей поверхности больших якорей с диаметром  $D_a > 40$  см.

полосовой меди. Тогда они засасывают воздух с коллектора и гонят его в стороны.

Удельную охлаждающую поверхность коллектора вычисляют по формуле:

$$a_k = \frac{S_k}{Q_k} = \frac{\pi D_k L_k}{Q_B + Q_r} (1 + 0,1 v_k), \quad (648)$$

где  $D_k$  и  $L_k$  — диаметр и длина коллектора (в см),  $v_k$  — окружная скорость коллектора в м/сек,  $Q_B$  — потери в контакте щеток,  $Q_r$  — потери на трение щеток о коллектор.

## ГЛАВА XII

### ВЕНТИЛЯЦИЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

#### А. СПОСОБЫ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ УСИЛЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

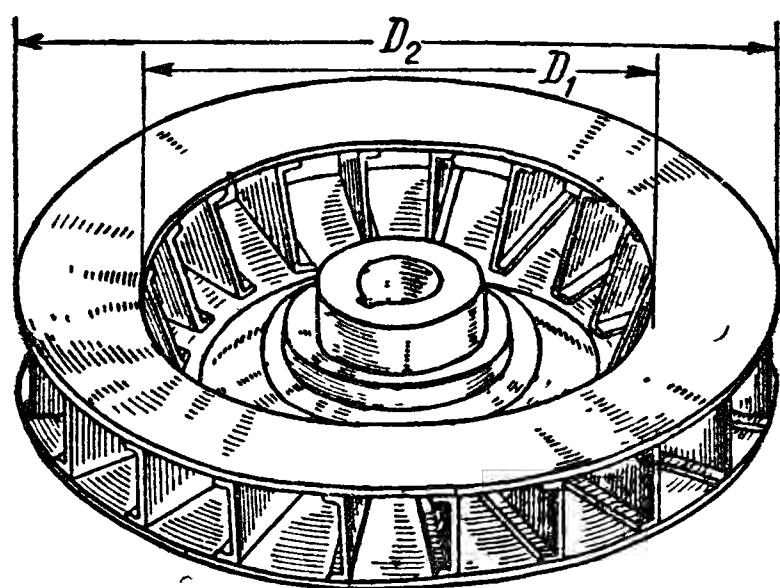
##### 263. Типы вентиляторов, встраиваемых в машину постоянного тока

Из трех типов вентиляторов, встраиваемых в эл. машины для усиления их вентиляции, в машинах постоянного тока обычно применяют центробежный вентилятор и в редких случаях осевой, или пропеллерный, вентилятор, третий тип — ковшевой вентилятор — в машине постоянного тока, выполняемой, как правило, с внутренним вращающимся якорем, совсем не применим.

Центробежные вентиляторы гонят воздух от центра эл. машины к периферии, независимо от направления вращения машины. Если при конструировании центробежного вентилятора имеется в виду определенное, одностороннее направление вращения машины, то лопаткам центробежного вентилятора можно придать наклонное расположение, которое обеспечивает безударный вход воздуха в вентилятор, а следовательно, и уменьшение потерь на вентиляцию. Такой вентилятор может работать и при обратном направлении вращения машины, однако его эффективность и коэффициент полезного действия будут меньше.

В осевом, пропеллерном вентиляторе воздух гонится в осевом направлении машины, при этом с изменением направления вращения машины изменяется на обратное и направление движения воздуха.

В дальнейшем будем рассматривать центробежный вентилятор, имеющий преимущественное значение для машин постоянного тока.



Фиг. 337. Центробежный вентилятор.

##### 264. Способы вентиляции машин постоянного тока и два возможных принципа действия встроенного вентилятора

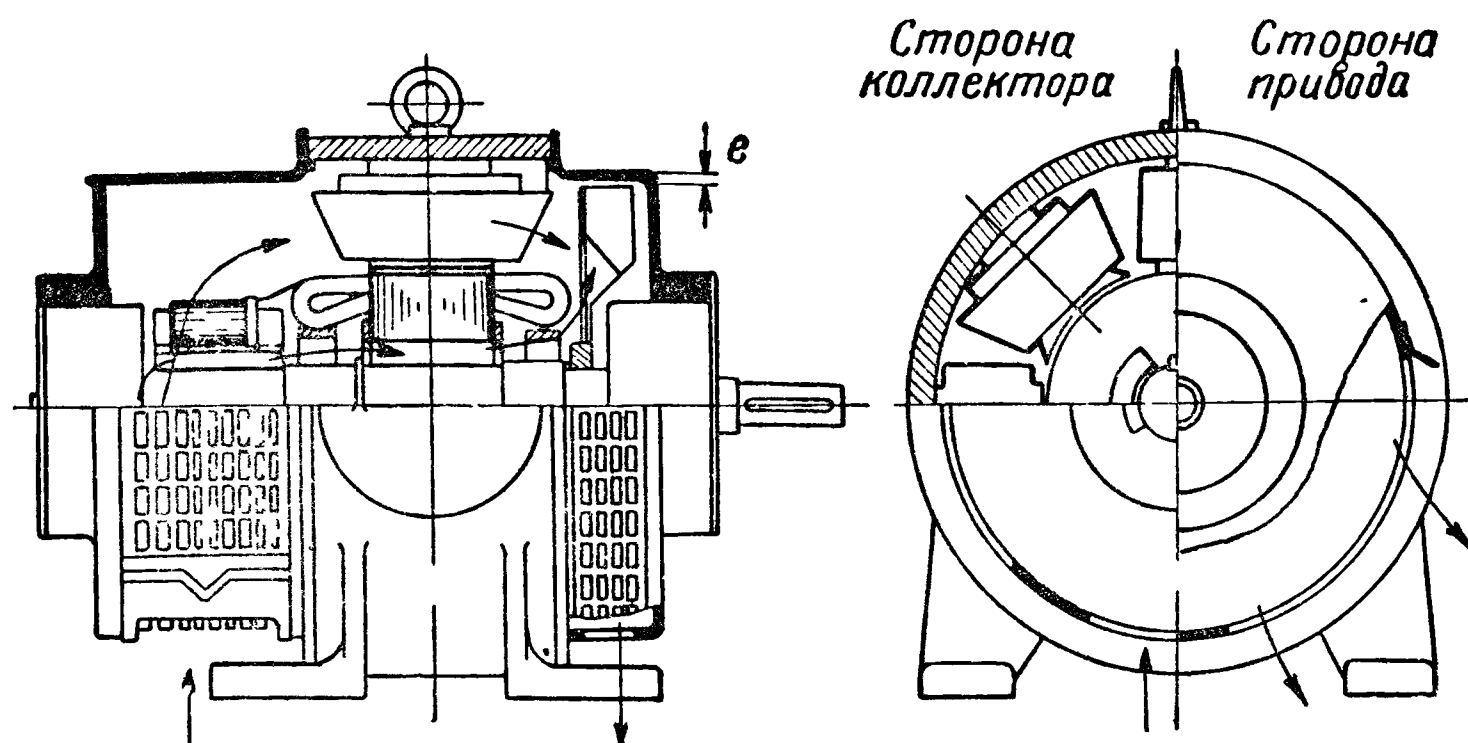
Способы вентиляции эл. машин вообще и, в частности, машин постоянного тока были разобраны в гл. I (§ 24). По принципу действия самовентиляция эл. машины при помощи встроенного центробежного вентилятора может быть либо всасывающей, либо нагнетательной вентиляцией. При всасывающей усиленной самовентиляции воздух, засасываемый центробежным вентилятором из внешней среды, проходит через машину, через вентилятор и затем выбрасывается наружу; для этого нужно соответствующим образом организовать вход и выход вентилирующего воздуха. При нагнетательной усиленной вентиляции воздух, засасываемый центробежным вентилятором из наружной

среды, проходя сначала через вентилятор, где за счет вентиляционных потерь машины подогревается на  $3-7^{\circ}\text{C}$  и затем поступает в машину и выбрасывается наружу. Из-за этого подогрева воздуха в вентиляторе расход воздуха, требуемый для вентиляции, увеличивается при прочих равных условиях на 15—20%.

При всасывающей усиленной вентиляции вентилятор, как правило, встраивают со стороны привода, т. е. со стороны, противоположной коллектору. Преимуществом такого расположения вентилятора является возможность в машинах постоянного тока, не требующих закрытого исполнения, делать защитный щит со стороны коллектора открытым, а в закрытых машинах делать его с открывающимися отверстиями (люками) и пользоваться ими для осмотра коллектора и щеток без заметного нарушения вентиляции. Раньше избегали устройства всасывающей центробежной вентиляции с расположением вентилятора со стороны привода, опасаясь, что при засосе воздуха, прошедшего через коллектор, угольная пыль от стирания щеток и измельченная медь от стирания щетками коллектора будут портить изоляцию якорной обмотки. Однако опыт не подтвердил этих опасений при обычных окружных скоростях вращения коллектора (не более 30 м/сек) и при применении угольных и угольно-графитовых щеток и современной хорошей пропитке лаком якорной обмотки. Опасность становится реальной в быстроходных машинах постоянного тока, в особенности низковольтных с медно-угольными или с медными щетками. В этих случаях приходится либо помещать всасывающий центробежный вентилятор со стороны коллектора, идя на кратковременное нарушение вентиляции при открывании люков для осмотра коллектора и щеток, либо применять нагнетательный центробежный вентилятор со стороны привода, мирясь с меньшей его эффективностью (из-за подогрева нагнетательным вентилятором засасываемого воздуха, на что обращалось внимание выше).

### 265. Системы вентиляции машин постоянного тока

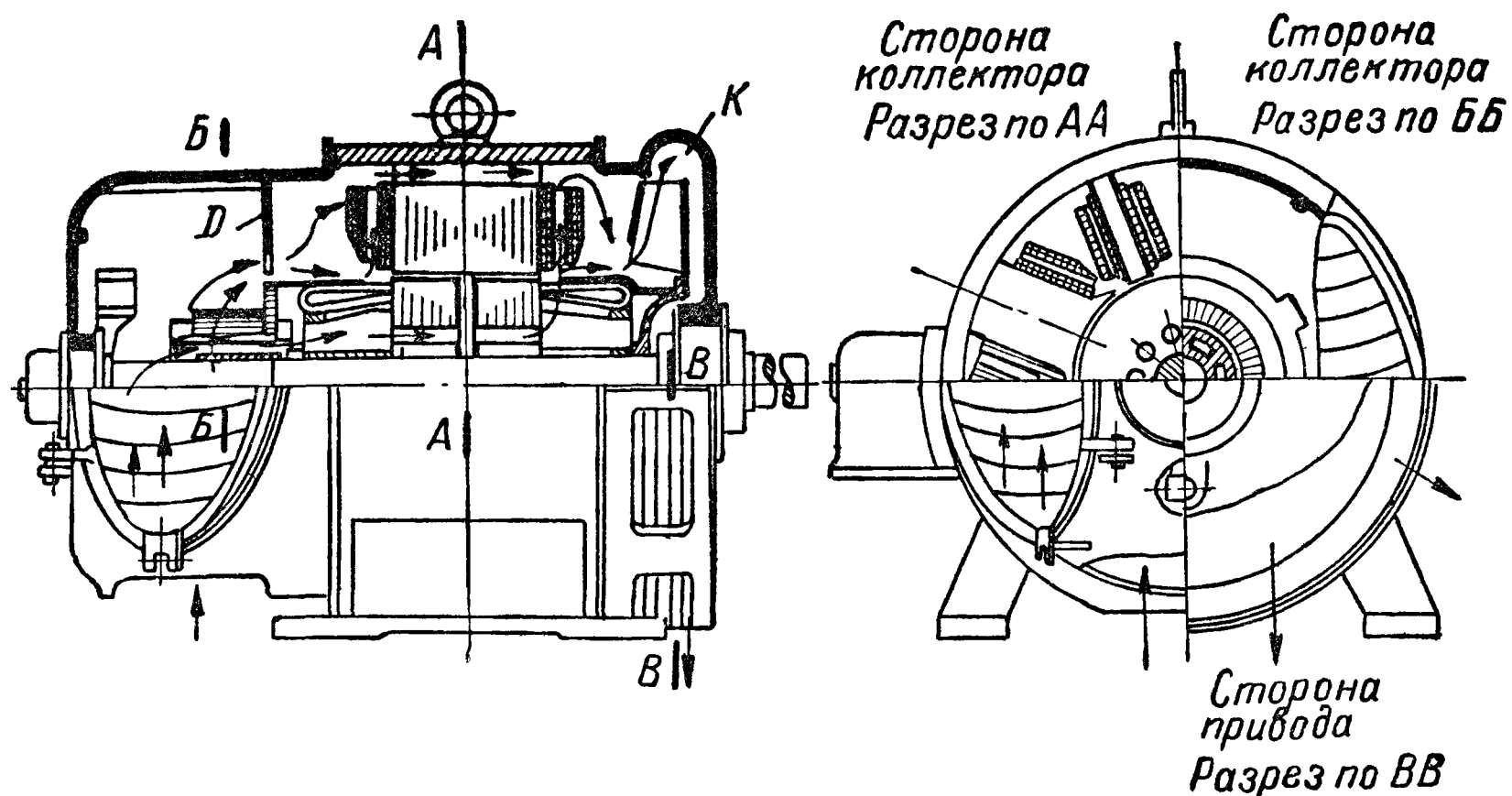
В зависимости от направления внутри машины струй вентилярующего воздуха различают разные системы вентиляции машин постоянного тока. При разработке конструкции машины постоянного тока можно предусмотреть



Фиг. 338 Схема машины с аксиальной вентиляцией

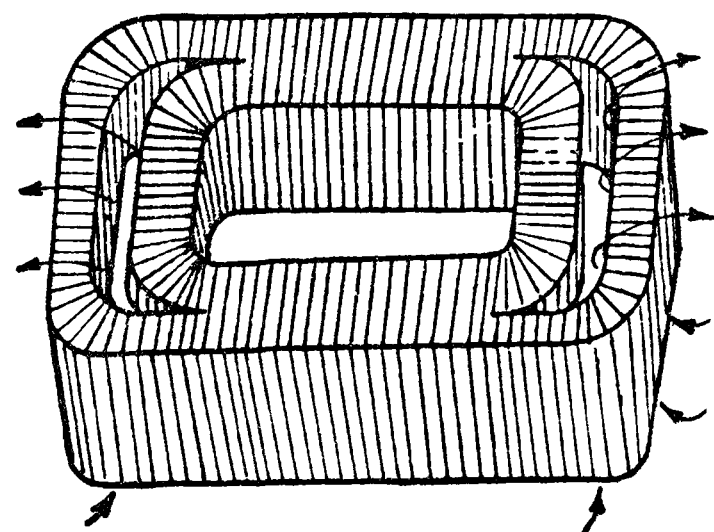
систему вентиляции одного из трех видов: либо аксиальную, либо радиальную, либо аксиально-радиальную.

Для осуществления аксиальной системы вентиляции машины нужно предусмотреть движение вентилярующего воздуха в осевом направлении машины. Для этой цели в небольших машинах постоянного тока с всасывающей вентиляцией при расположении центробежного вентилятора со стороны привода вентилярующий воздух, поступающий в машину со стороны коллек-



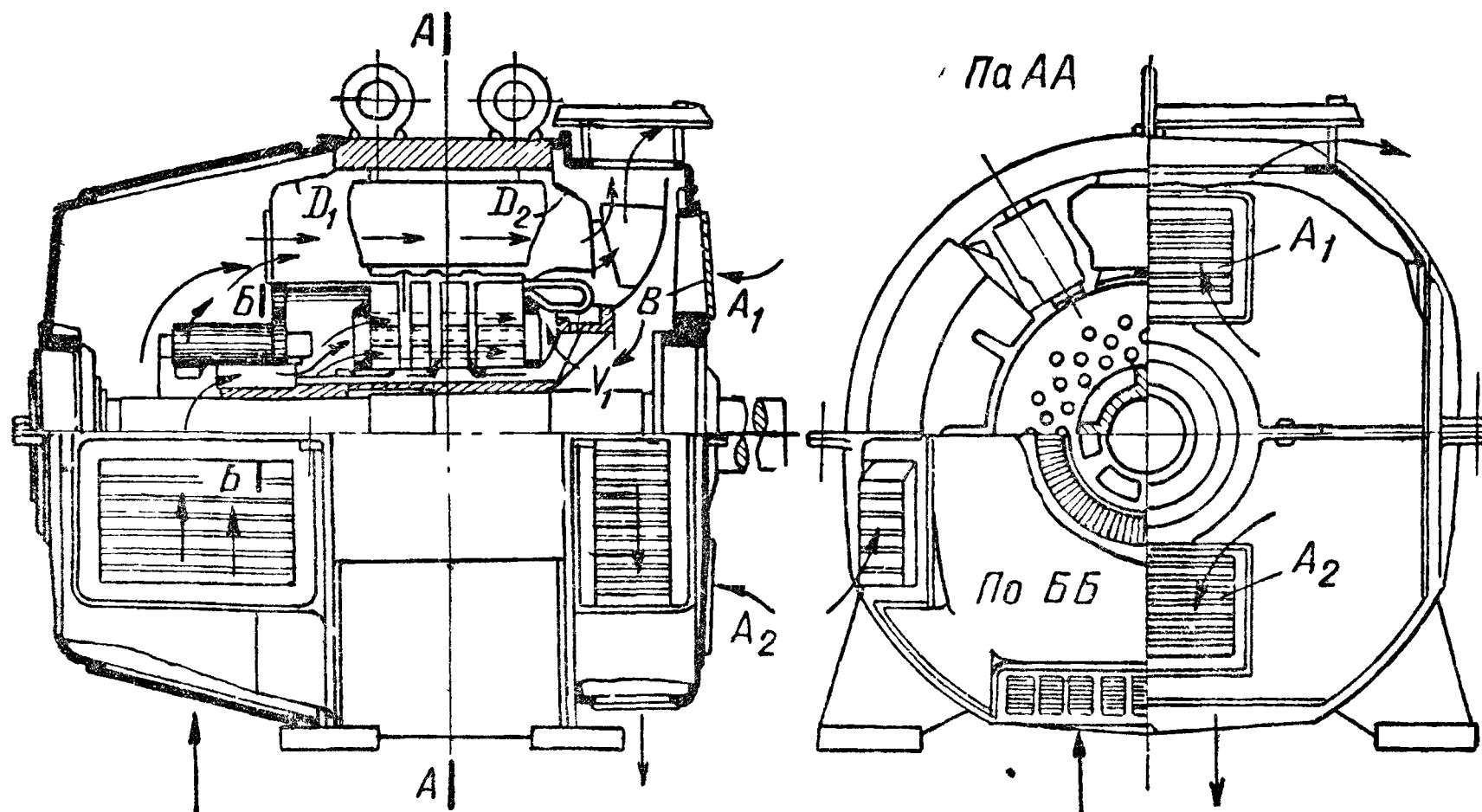
Фиг. 339. Схема машины с аксиально-радиальной вентиляцией.

тора, омывает коллектор и якорь и параллельными струями, проходя между полюсами, направляется к вентилятору и дальше наружу. В этом случае катушки возбуждения главных магнитных полюсов часто делают для лучшего их охлаждения с каналами, параллельными оси машины. При больших размерах якоря у вала образуются осевые каналы, через которые также проходит воздух, предварительно пройдя через каналы в ступице коллектора (фиг. 338). При еще больших размерах якоря, насаживаемого на якорную звезду, делают, кроме осевых каналов у вала, еще круглые осевые вентиляционные каналы в один либо в два ряда в сердечнике якоря.



Фиг. 340. Катушки полюсов с каналами по направлению радиусов якоря.

Аксиальная система вентиляции для небольших и средних машин постоянного тока, имеющих небольшие длины якоря, оказалась наиболее эффективной и нашла себе в них преимущественное применение. Так, все машины постоянного тока нормальной серии ПН, а также все машины серии П100 завода «Электросила» спроектированы с этой системой вентиляции.



Фиг. 341. Машина с выгородками для направления струй воздуха.

При радиальной системе вентиляции, применяемой для более крупных машин постоянного тока, необходимо при их проектировании обеспечить, чтобы вентилярующий воздух, входящий в машину у вала, направлялся затем по радиальным вентиляционным каналам шириной до 10 мм; дистанционные распорки в этих каналах, называемые ветренницами, играют роль лопаток центробежного вентилятора.

Чисто радиальная система вентиляции применяется в настоящее время для сравнительно небольших открытых машин постоянного тока. В больших машинах постоянного тока, имеющих значительную длину якоря, устраивают аксиально-радиальную вентиляцию (фиг. 339). При этом полюсные катушки главных магнитных полюсов делают с каналами по направлению радиусов якоря (фиг. 340).

Для желательного направления струй входящего воздуха устраивают в машине специальные выгородки — на фиг. 341 обозначены буквами  $D_1$  и  $D_2$ .

## Б. ОСНОВЫ ВЕНТИЛЯЦИОННОГО РАСЧЕТА МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 266. Исходные положения

Воздух, используемый для осуществления усиленной вентиляции эл. машин, представляет собой в основном смесь двух газов — азота и кислорода; имеется еще незначительная примесь небольших количеств прочих инертных газов, влаги и твердых частиц во взвешенном состоянии; однако их можно не принимать во внимание. Вследствие указанного состава воздух является сжимающейся средой, подчиняющейся газовым законам, установленным Бойлем и Мариотом и Гэи-Люссаком.

Однако при высоте места работы эл. машины, принимаемой по ГОСТ 183-41 не более 1000 м над уровнем моря, естественно меняющееся атмосферное давление и температура воздуха претерпевают относительно небольшие колебания. Также невелико создаваемое в эл. машине добавочное давление воздуха, необходимое для ее вентиляции, и подогрев воздуха потерями эл. машины при его прохождении через машину. Вследствие этого вентилярующий воздух можно рассматривать как газовой средой постоянной плотности, равной  $\gamma = 1,1 \text{ кг/м}^3$  (что соответствует нормальному атмосферному давлению в 760 мм рт. ст. и температуре воздуха в  $50^\circ \text{C}$ ), т. е. как несжимаемую жидкость — воду и применять к нему законы гидравлики, в частности, уравнение Бернулли. Это упрощение значительно облегчает расчеты вентиляции эл. машин и вполне оправдывается тем, что даже при этом упрощении расчеты вентиляции можно выполнить только приближенно: причиной этого является сложность явлений и необходимость пользоваться при расчете вентиляции рядом средних опытных значений для сопротивлений движению воздуха при его прохождении через эл. машину.

Уравнение Бернулли для несжимаемой жидкости дает возможность определить скоростной напор жидкости, чем мы и воспользуемся.

### 267. Задача вентиляционного расчета машины постоянного тока

Задача сводится к определению двух величин: 1) количества воздуха (в куб метрах в секунду), необходимого для того, чтобы удалить из машины потери энергии, не дав подняться выше допустимых пределов температуре отдельных частей машины над температурой воздуха, входящего в машину для ее вентиляции; 2) необходимого повышения давления воздуха, входящего в машину, для того чтобы обеспечить требуемый расход воздуха, нужного для вентиляции машины. Зная указанные две величины, можно сконструировать вентилятор для машины и определить мощность, необходимую на его



вращение. При устройстве встроенного в машину вентилятора эта мощность должна быть учтена в потерях машины; при устройстве независимой вентиляции мощность, нужная на его вращение, к потерям машины не относится, но должна быть известной (§ 272).

### 268. Вычисление расхода воздуха, необходимого для усиленной вентиляции эл. машины

Обозначим через  $Q_{\Sigma}' = Q_{\Sigma} - Q_R$  потери мощности в машине за вычетом потерь в подшипниках; последние рассеиваются подшипниками либо непосредственно, либо путем охлаждения подшипников водой. Потери  $Q_{\Sigma}'$  должны уноситься вентилярующим воздухом.

Обозначим через  $G$  вес воздуха, проходящего через машину в 1 сек.; через  $c_p$  — теплоемкость воздуха при постоянном давлении; через  $\theta$  — повышение температуры этого объема воздуха при установившемся режиме из-за подогрева его потерями. Тогда тепло  $Q$ , уносимое воздухом, может быть определено из выражения:

$$Q = Gc_p\theta. \quad (649)$$

Заменяя здесь вес  $G$  через объем  $V$  и плотность  $\gamma$ , получим:

$$Q = V\gamma c_p\theta.$$

Это, очевидно, должно равняться потерям машины  $Q_{\Sigma}'$ :

$$Q_{\Sigma}' = V\gamma c_p\theta. \quad (650)$$

Отсюда находим потребный расход воздуха.

$$V = \frac{Q_{\Sigma}'}{\gamma c_p\theta} = \frac{Q_{\Sigma}'}{c_p'\theta}. \quad (651)$$

Подставляем  $Q_{\Sigma}'$  — в *квт*,  $\theta$  — в  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\gamma = 1,1 \text{ кг/м}^3$ ,  $c_p = 0,24 \text{ ккал/град} \cdot \text{м}^3$ ,  $c_p' = \gamma c_p = 1,1 \cdot 0,24 = 0,26 \text{ ккал/град} \cdot \text{м}^3$ .

Так как  $1 \text{ ккал} = 4,18 \text{ квтсек}$ , то

$$c_p' = 0,26 \cdot 4,18 \approx 1,1 \text{ квтсек/град} \cdot \text{м}^3.$$

Таким образом, потребный расход воздуха на вентиляцию составит:

$$V = \frac{Q_{\Sigma}'}{1,1\theta} [\text{м}^3/\text{сек}]. \quad (652)$$

### 269. Вычисление скоростного напора на выходе из эл. машины

При секундном расходе вентилярующего воздуха  $V$  и при площади сечения выходного отверстия машины  $S$  скорость воздуха на выходе будет:

$$v = V/S. \quad (653)$$

Подставляя  $V$  в  $\text{м}^3/\text{сек}$ ,  $S$  — в  $\text{м}^2$ , получаем  $v$  в  $\text{м/сек}$ .

Для обеспечения этой скорости воздуха вентилятор должен обеспечить давление воздуха на выходе из эл. машины  $p_d$ , определяемое формулой Бернулли:

$$p_d = \frac{\gamma v^2}{2g}. \quad (654)$$

Здесь  $\gamma$  — плотность воздуха,  $g$  — ускорение силы тяжести. Подставляя, как и выше,  $\gamma = 1,1 \text{ кг/м}^3$ ,  $g$  — в  $\text{м/сек}^2$ ,  $v$  — в  $\text{м/сек}$ , получим  $p_d$  в  $\text{кг/м}^2$ :

$$p_d = \frac{1,1}{2 \cdot 9,81} v^2 = 56v^2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^2. \quad (655)$$

Так как  $1 \text{ м}^3$  воды равен  $10^3 \text{ дм}^3$  и весит  $10^3 \text{ кг}$ , то на площади в  $1 \text{ м}^2$  давление в  $1 \text{ кг}$  может создать столб воды высотой  $\frac{1}{10^3} = 0,001 \text{ м}$ , или высотой в  $1 \text{ мм}$ . Таким образом, давление, выраженное в  $\text{кг/м}^2$ , численно равно высоте столба воды в миллиметрах. Выражая давление  $p_d$  высотой водяного столба  $h_d$  в миллиметрах, называют это давление **с к о р о с т н ы м н а п о р о м**. Таким образом, можем написать:

$$h_d \text{ в мм вод. ст. равно } p_d \text{ в кг/м}^2. \quad (656)$$

## 270. Вычисление потерь давления воздуха в эл. машине

Потери давления воздуха, или потери напора  $h_i$ , на каком-нибудь, например на  $i$ -том, участке пути воздуха в эл. машине из-за сопротивления на этом участке можно выразить в долях скоростного напора  $p_{di}$ , который имеется на данном участке, путем введения коэффициента  $\zeta_i$ :

$$h_i = \zeta_i p_{di} = \zeta_i \frac{\gamma v_i^2}{2g}. \quad (657)$$

Коэффициент  $\zeta_i$  называется **аэродинамическим**, или **гидравлическим**, коэффициентом сопротивления воздуха на  $i$ -том участке пути.

Таким образом, чтобы прогонять через эл. машину в секунду  $V$  куб. метр воздуха, нужно создать вентилятором напор:

$$H = h_d + \sum h_i = h_d + h_{\Sigma}, \quad (658)$$

где  $h_{\Sigma}$  — суммарная потеря напора на всем пути воздушного потока в эл. машине.

Вследствие сложности внутреннего устройства машин постоянного тока аэродинамические сопротивления отдельных участков пути воздушного потока в машине приходится брать по средним значениям их, определенным опытным путем. При этом аэродинамическое сопротивление на  $i$ -том участке пути выражают, как указывалось выше, в долях скоростного напора  $p_{di}$ , который имеется на данном участке пути, по формуле (657). Средние значения коэффициентов аэродинамических сопротивлений  $\zeta_i$  приводятся ниже.

а) При входе воздуха в эл. машину. Для возможных форм краев входных отверстий, влияющих на значения  $\zeta_i$  (фиг. 342), имеем следующие значения:

При выступающих краях (фиг. 342, а)	...	$\zeta_i = 0,8$
При прямоугольных краях (фиг. 342, б)	...	$\zeta_i = 0,5$
При закругленных краях с радиусом закругления, равным $r = 0,1 d$ , где $d$ — диаметр круглого входного отверстия (фиг. 342, в)		$\zeta_i = 0,2$
При закругленных краях с радиусом закругления $r \approx d$ (фиг. 342, г)	...	$\zeta_i = 0$

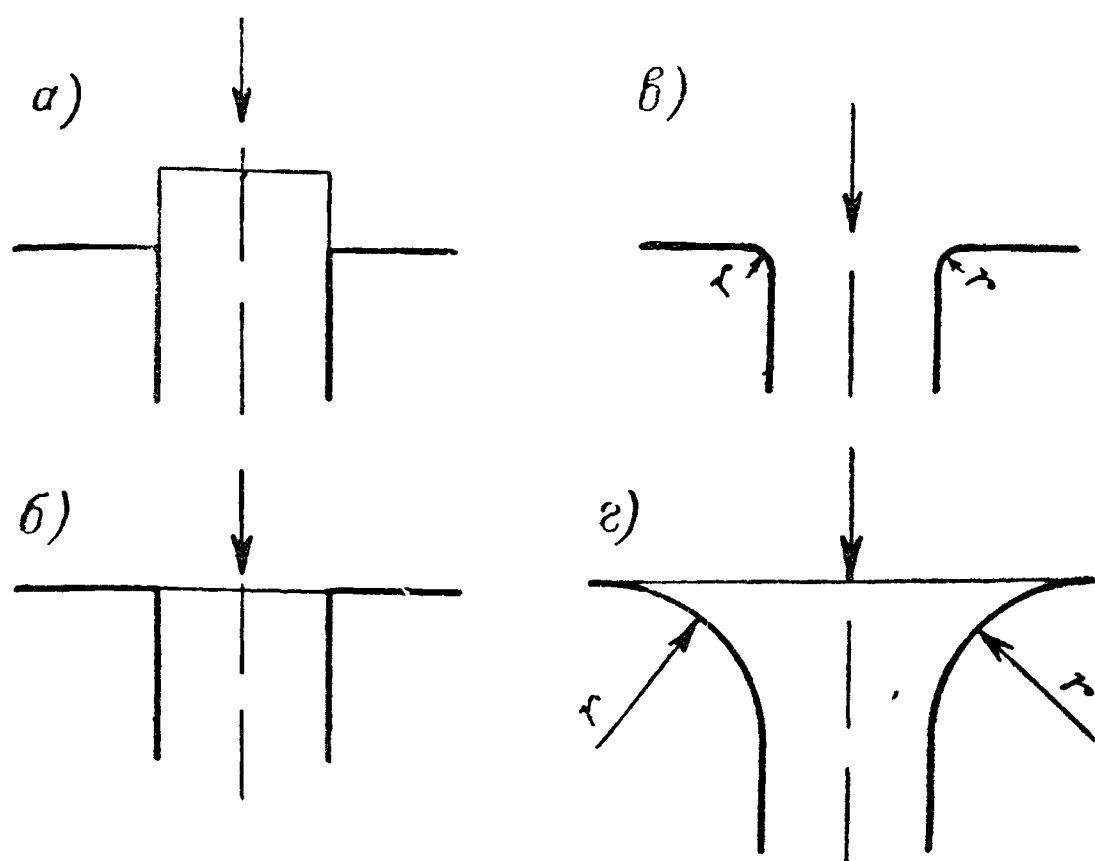
б) При внезапном изменении сечения пути воздуха (фиг. 343, а). При внезапном сужении площади сечения пути  $\zeta_i$  можно определить по отношению  $\alpha_i$  последующей (суженной) площади сечения  $S_2$  к первоначальной (широкой) площади сечения  $S_1$  из следующей таблички:

$\alpha_i = S_2/S_1$ :	0,1	0,4	0,8
$\zeta_i$ :	0,5	0,35	0,15

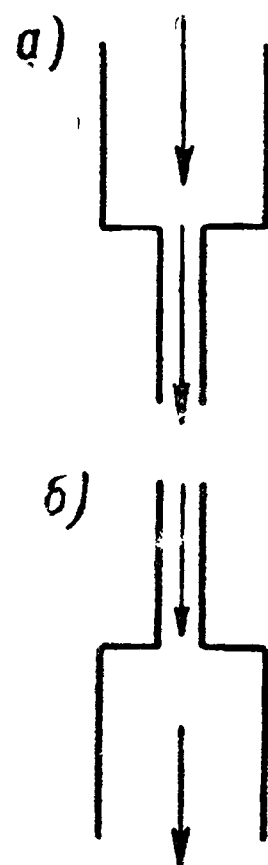
Для промежуточных значений  $\alpha_i$  можно пользоваться для определения  $\zeta_i$  интерполяцией между приведенными значениями.

При внезапном расширении площади сечения (фиг. 343, б) коэффициент  $\zeta_i$  можно брать по отношению последующего (расширенного) сечения  $S_2$  к первоначальному (узкому) сечению  $S_1$  по формуле:

$$\zeta_i = \left( \frac{S_2}{S_1} - 1 \right)^2. \quad (659)$$



Фиг. 342. Формы краев входных отверстий.



Фиг. 343. Формы изменения сечения воздухопровода.

в) При изменении направления струи воздуха (фиг. 344).

При изменении направления под прямым углом (фиг. 344, а)	$\zeta_i = 1,5 \div 2,0$
То же, но с небольшим закруглением (фиг. 344, б)	$\zeta_i = 0,5$
При угле в $135^\circ$ (фиг. 344, в)	$\zeta_i = 0,5$
При угле в $135^\circ$ с радиусом закругления $r = 2d$ (фиг. 344, г)	$\zeta_i = 0,25$
При повороте с закруглением радиуса $r = d$ (фиг. 344, д)	$\zeta_i = 1,0$
То же, но с $r = 3d$ (фиг. 344, е)	$\zeta_i = 0,2$
То же, но с $r = 6d$ (фиг. 344, ж)	$\zeta_i = 0$
При встроенной на повороте перегородкой и $r = d$	$\zeta_i = 0,3$

г) При выходе струи воздуха в свободное пространство коэффициент  $\zeta_i$  берется равным  $\zeta_i = 1,0$

д) При закручивании струи воздуха. Этот случай мы имеем, например, при вращающихся аксиальных каналах якоря машины постоянного тока. В этом случае можно вести расчет так, как будто якорь неподвижен, т. е. брать  $\zeta_i \approx 0$

## 271. Аэродинамическое сопротивление всего пути воздушного потока в эл. машине

а) Суммируя потери напора вентилирующего воздуха на отдельных участках его пути в эл. машине, получаем:

$$h_\Sigma = \sum h_i = \sum_{i=1}^n \zeta_i \gamma \frac{v_i^2}{2g}. \quad (660)$$

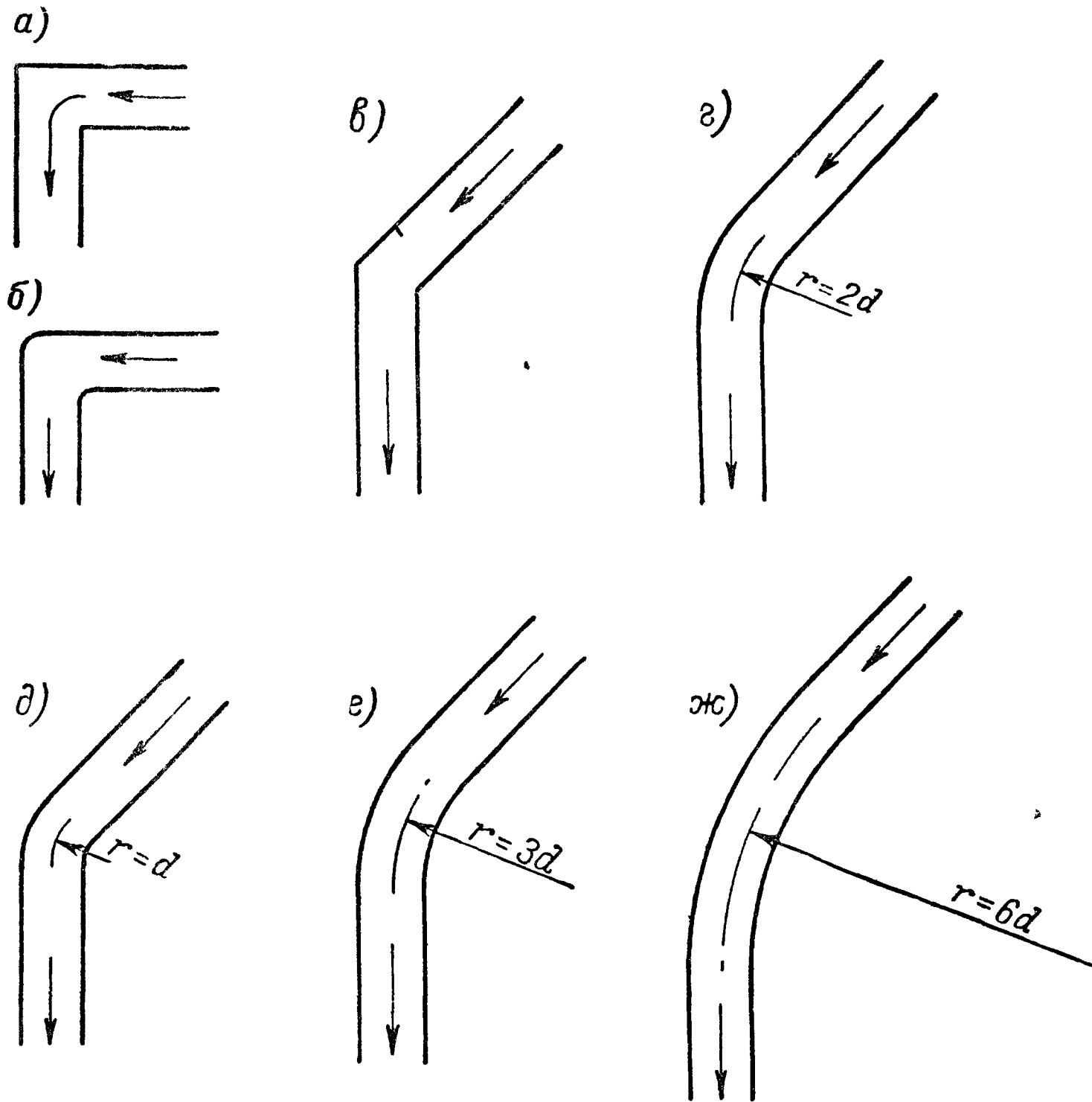
Расход воздуха, входящего в эл. машину через вентилятор и выходящего через выходное отверстие воздуха в машине, можно считать одинаковым (пренебрегаем небольшими утечками воздуха через неплотности) и равным  $V$ .

Обозначая площадь сечения пути воздуха на  $i$ -ом участке через  $S_i$ , получим по (653), что скорость воздуха на  $i$ -ом участке будет равна

$$v_i = V/S_i. \quad (661)$$

Подставляя это в (660), находим.

$$h_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \zeta_i \frac{\gamma v_i^2}{2g} = V^2 \left( \sum_{i=1}^n \zeta_i \frac{\gamma}{2g S_i^2} \right) = V^2 Z. \quad (662)$$



Фиг. 344. Изменение направления струй воздуха.

Здесь

$$Z = \sum_{i=1}^n \zeta_i \frac{\gamma}{2g S_i^2}. \quad (663)$$

При принимаемой неизменной плотности воздуха  $\gamma = 1,1 \text{ кг/м}^3$  и при  $g = 9,81 \text{ м/сек}^2$  можно (663) переписать так:

$$Z = \frac{\gamma}{2g} \sum \zeta_i / S_i^2. \quad (663a)$$

Отсюда следует, что при неизменных  $\gamma$  и  $g$  величина  $Z$  зависит только от геометрических размеров и от конфигурации пути воздушного потока в эл. машине. При  $V = 1 \text{ м}^3/\text{сек}$  из (662) получаем:

$$h_{\Sigma} = Z, \quad (664)$$

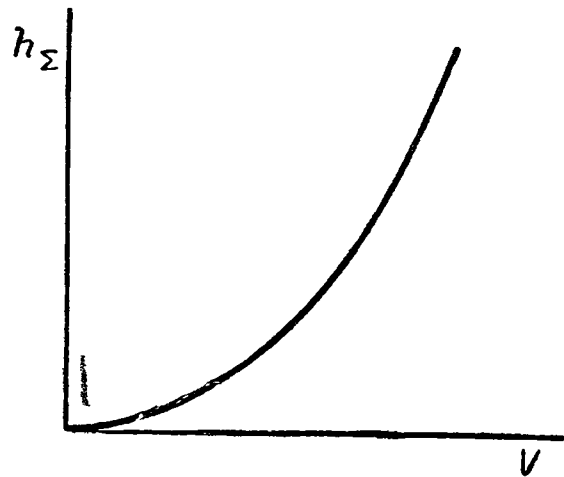
т. е.  $Z$  дает потерю напора в эл. машине при прохождении через нее  $1 \text{ м}^3$  в секунду. Эту величину поэтому называют аэродинамической, или г и д р а в-

лической, постоянной воздухопровода (поскольку воздух мы рассматриваем как несжимаемую жидкость — воду).

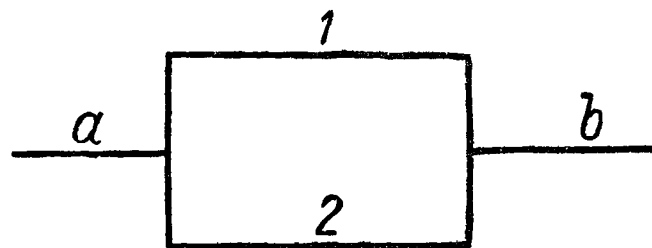
Из выражения (662) следует, что зависимость  $h_{\Sigma} = f(V)$  имеет параболический характер, она носит название характеристики воздухопровода (фиг. 345).

б) Выше мы исходили из предположения, что все участки пути вентилирующего воздуха в эл. машине включены последовательно; это позволило нам при определении суммарного сопротивления воздухопровода суммировать гидравлические сопротивления отдельных участков.

Если в каком-либо месте воздухопровода происходит разветвление пути воздуха надвое, а затем соединение ветвей (фиг. 346), то, как в точке  $a$  — расхождения путей, так и в точке  $b$  — соединения их, давление должно быть общим, одинаковым.



Фиг. 345. Зависимость потери напора от расхода воздуха.



Фиг. 346. Разветвление струй воздуха

По этой причине гидравлическое сопротивление разветвленной части воздухопровода можно объединить в некоторое эквивалентное гидравлическое сопротивление, вычисленное следующим образом.

Пусть под влиянием разности давлений в точках  $a$  и  $b$ , равной

$$H = H_a - H_b, \quad (665)$$

по участкам 1 и 2 разветвленного воздухопровода проходят расходы воздуха  $V_1$  и  $V_2$ . Тогда, пользуясь (662), можем написать:

$$H = Z_1 V_1^2, \quad H = Z_2 V_2^2. \quad (666)$$

Отсюда имеем:

$$V_1 = \sqrt{H/Z_1}; \quad V_2 = \sqrt{H/Z_2}. \quad (667)$$

Расход воздуха в точках  $a$  и  $b$  должен равняться неизменному расходу воздуха  $V$ , поэтому для суммы объемов  $V_1$  и  $V_2$  пишем:

$$V = V_1 + V_2. \quad (668)$$

Используя (668) и обозначая эквивалентное гидравлическое сопротивление через  $Z_e$ , можем написать:

$$H = Z_e V^2 \quad \text{или} \quad V = \sqrt{\frac{H}{Z_e}}. \quad (669)$$

Подставляя (669) и (667) в (668), получаем:

$$\sqrt{\frac{H}{Z_e}} = \sqrt{\frac{H}{Z_1}} + \sqrt{\frac{H}{Z_2}},$$

или, по сокращении на  $\sqrt{H}$ :

$$\frac{1}{\sqrt{Z_e}} = \frac{1}{\sqrt{Z_1}} + \frac{1}{\sqrt{Z_2}}.$$



Отсюда находим

$$\sqrt{Z_e} = \frac{\sqrt{Z_1 Z_2}}{\sqrt{Z_1} + \sqrt{Z_2}}, \quad Z_e = \frac{Z_1 Z_2}{(\sqrt{Z_1} + \sqrt{Z_2})^2}. \quad (670)$$

в) Если бы между точками  $a$  и  $b$  воздухопровод разветвлялся на  $n$  рукавов, то, обозначая эквивалентное гидравлическое сопротивление разветвленного участка через  $Z_e$ , мы получили бы

$$\frac{1}{\sqrt{Z_e}} = \frac{1}{\sqrt{Z_1}} + \frac{1}{\sqrt{Z_2}} + \frac{1}{\sqrt{Z_3}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{Z_n}},$$

или

$$\sqrt{Z_e} = \frac{1}{\frac{1}{\sqrt{Z_1}} + \frac{1}{\sqrt{Z_2}} + \frac{1}{\sqrt{Z_3}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{Z_n}}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{\sqrt{Z_i}} \right)}, \quad (671)$$

$$Z_e = \frac{1}{\left[ \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{\sqrt{Z_i}} \right) \right]^2}. \quad (672)$$

## 272. О проектировании центробежного вентилятора для машин постоянного тока

Расчет и конструкция вентиляторов для эл. машин входит составной частью в конструкцию эл. машин, и их расчет на механическую прочность рассматривается в книгах, посвященных этим вопросам [Л. 9]. Здесь мы коснемся этих вопросов лишь в объеме, необходимом при изучении теории машин постоянного тока, выполняемых с усиленной вентиляцией. Как мы уже отмечали, для наших целей достаточно рассмотреть только центробежный вентилятор.

Цель вентилятора состоит в создании в машине напора воздуха, обеспечивающего при номинальной скорости вращения машины прохождение через нее нужного расхода воздуха. Поэтому исходными данными при расчете вентилятора являются номинальная скорость машины  $n_N$ , необходимый напор воздуха  $H$  и необходимый расход воздуха  $V$ .

Напор  $H$  в мм вод. ст., равный давлению  $p$  в кг/м<sup>2</sup>, создаваемому вентилятором, определяется по формуле:

$$p = p_2 - p_1 = \eta_a \frac{\gamma}{2g} (u_2^2 - u_1^2) \quad (673)$$

Здесь  $\eta_a$  — аэродинамический к. п. д. вентилятора, учитывающий потерю в нем давления, для центробежного вентилятора с радиальными лопатками  $\eta_a = 0,2 \div 0,3$ ,  $\gamma$  — плотность воздуха; при стандартном атмосферном давлении в 760 мм рт. ст. и температуре воздуха  $t = 20^\circ \text{C}$  имеем  $\gamma = 1,1 \text{ кг/м}^3$ ,  $g$  — ускорение силы тяжести,  $g = 9,81 \text{ м/сек}^2$ ,  $u_1$  и  $u_2$  — окружные скорости воздуха в м/сек в точках входа и выхода из вентилятора,  $p_1$  и  $p_2$  — давление воздуха в тех же точках на лопатках вентилятора,  $p$  состоит из суммы статического и динамического давления воздуха в воздухопроводе.

Рассмотрим два характерных режима работы вентилятора при номинальной скорости вращения. 1) холостой ход вентилятора, т. е. работа с закрытым воздухопроводящим отверстием, иначе говоря, при количестве воздуха, проходящего через вентилятор, равном нулю ( $V = 0$ ), и 2) короткое замыкание

вентилятора, когда вентилятор дает максимально возможное количество воздуха ( $V = V_{\max}$ ). В режиме холостого хода мы имеем только статическое давление, при коротком замыкании все развиваемое вентилятором давление расходуется на прохождение воздуха через вентилятор, — имеется только динамический напор, который тратится на прохождение воздуха через вентилятор. Строя в прямоугольных координатах кривую зависимости полного давления  $p$  вентилятора от расхода воздуха  $V$  через вентилятор  $p = f(V)$ , мы получим характеристику вентилятора, она представлена на фиг. 347 кривой 1.

Нанеся на ту же фиг. 347 характеристику воздухопровода  $h_{\Sigma} = ZV^2$  (кривая 2), т. е. зависимость необходимого давления от расхода воздуха  $V$ , мы получим в их пересечении точку, которая будет определять тот расход воздуха, который вентилятор может прогнать через машину.

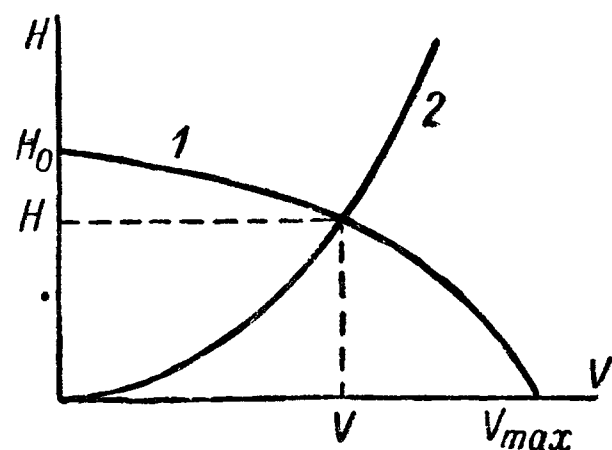
Мощность, потребная на вращение вентилятора, приблизительно вычисляется по формуле:

$$P = \frac{Vp}{\eta_m} \text{ [кгм/сек]}, \quad (674)$$

или

$$P = 9,81 \frac{Vp}{1000 \eta_m} \text{ [квт]}, \quad (674a)$$

где  $V$  — требуемый расход воздуха в  $\text{м}^3/\text{сек}$ ,  $\eta_m$  — механический к. п. д. вентилятора;  $p = p_2 - p_1$  — давление в  $\text{кг}/\text{м}^2$  воздуха, представляющее собой разность давлений на внешней и внутренней кромках лопаток,  $p$  состоит из статического и динамического давлений.



Фиг. 347 Характеристики вентилятора (1) и воздухопровода (2) для определения расхода воздуха.

---

---

## ПОСЛЕСЛОВИЕ

### ОБ ИСТОРИЧЕСКОМ РАЗВИТИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА И ИХ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

#### 1. Литературные источники

Книг, рисующих постепенное развитие теории и практики электромашиностроения, пока не имеется. Много интересных сведений о первых этапах развития эл. машин можно найти в книгах, написанных в конце прошлого и в самом начале текущего столетия [Л. 25 и 26]. Обзоров, охватывающих более или менее длительный период развития отдельных типов эл. машин, в частности эл. машин постоянного тока, также немного [Л. 27 и 28].

Ценный почин в собирании и систематизации подлинных источников, проливающих свет на основные этапы научной и изобретательской мысли, которые привели к современным типам эл. машин постоянного тока, был сделан Академией Наук СССР незадолго до второй мировой войны. Академией были выпущены тогда под редакцией академика В. Ф. Миткевича два тома материалов и документов по истории эл. машин постоянного тока, собранных и расположенных в хронологическом порядке Д. В. Ефремовым и М. И. Радовским и снабженных ими комментариями и систематическими указателями. Первый том [Л. 29], вышедший в 1934 г., охватывает «Историю динамомшины» (эл. генератора постоянного тока) по 1886 г., второй том [Л. 30], изданный в 1936 г., посвящен «Истории электродвигателя» постоянного тока по 1883 г. Такая группировка документов и материалов мотивируется тем, что в течение длительного периода времени — до начала 60-х годов прошлого века — развитие эл. генератора и развитие электродвигателя постоянного тока шло совершенно самостоятельными путями, причем окончательное слияние путей развития произошло лишь к 1870 г., несмотря на то, что уже машина Начинотти (1860 г.) работала как генератором, так и двигателем.

#### 2. Основные исторические этапы в развитии эл. машин постоянного тока

а) В основу развития электродвигателя постоянного тока лег принцип электромагнитного вращения, получивший впервые четкую формулировку в работе Фарадея, опубликованной в 1822 г. на базе исследований Эрстеда, Ампера, Дэви и других [Л. 30, док. 1]. Этот год и следует считать началом электродвигателя, причем первой моделью его явилось знаменитое «колесо Бароу», 1824 г. [Л. 30, док. 2].

Началом развития эл. генератора нужно считать 1831 г., год открытия Фарадеем принципа электромагнитной индукции [Л. 29, док. 1], причем «диск Фарадея», использованный им в ряде опытов, был по существу первой моделью эл. генератора постоянного тока.

Характерно, что уже через два года, в 1833 г., появилась знаменитая работа русского академика Ленца, сформулировавшая закон, который впоследствии получил название «закона Ленца» и который был по существу доказательством идентичности явлений, происходящих в электродвигателе и в эл. генераторе [Л. 30, док. 5]. Однако надлежащие выводы из этого закона были сделаны только в работе другого русского академика Б. С. Якоби, опубликованной в 1847 г. [Л. 29, док. 18]. До широких же кругов эти выводы дошли лишь примерно к 60-м годам прошлого века, причем, как было отмечено выше, самостоятельное развитие эл. генераторов и электродвигателей закончилось только к 1870 г.

В течение этого времени — с 1831 по 1870 г. — было сделано несколько фундаментальных изобретений, оказавших решающее влияние на дальнейшее развитие эл. машин постоянного тока, это, во-первых, замена постоянных магнитов электромагнитами, во-вторых, открытие принципа самовозбуждения генераторов, в-третьих, изобретение якоря с замкнутой кольцевой обмоткой, в-четвертых, установление необходимости расслоения вращающейся части машины постоянного тока (якоря) на тонкие диски перпендикулярно к оси машины.

Однако между временем первого опубликования этих изобретений и их внедрением в практику проходили многие годы. Частично это объяснялось плохой взаимной информацией и ограниченным использованием многоязычной периодической литературой. Но главной причиной являлся факт, известный и из истории других отраслей техники, а именно, что идеи и изобретения, значительно опережающие эпоху, не могут найти себе надлежащего применения, пока почва для них не подготовлена.

Разрыв во времени между первым появлением упомянутых фундаментальных изобретений в области эл. машин постоянного тока и их внедрением в практику можно иллюстрировать следующими данными.

**Применение электромагнитов вместо постоянных магнитов.** Совершенно естественно, что эл. генератор постоянного тока начал развиваться в виде магнитоэлектрического генератора, т. е. генератора с постоянными магнитами. В 1851 г. Синстеден [Л. 29, док. 21], впервые в истории эл. машин, предложил применить вместо постоянных магнитов электромагниты, питаемые от магнитоэлектрической машины, и показал получаемый при этом эффект. Это предложение, однако, не нашло отклика и вскоре было забыто. Вторично электромагниты появились в 1863 г. в виде изобретения Уайльда (Wilde) [Л. 29, док. 28], после чего они вошли в широкое употребление.

**Открытие принципа самовозбуждения эл. генератора постоянного тока.** Впервые это открытие было сделано в Дании Хиортом (Sören Hjorth) в 1851 г. [Л. 29, док. 22], который доложил о нем в научном обществе в Копенгагене в 1852 г. Английские патенты были взяты Хиортом в 1854 и 1855 гг. [Л. 29, док. 23], причем небольшая самовозбуждающаяся эл. машина постоянного тока была выставлена им в 1855 г. в Лондоне на выставке физических приборов. Это замечательное изобретение, однако, не было оценено, и о нем вскоре забыли. Оно вновь возникло в 1866 г. и было закреплено несколькими патентами, навеянными, несомненно, вышеупомянутой работой Уайльда [Л. 29, док. 28 и 48]. Патенты на самовозбуждающийся эл. генератор постоянного тока с последовательным соединением обмоток возбуждения и якоря были взяты в конце 1866 г. К. и С. А. Верлеями [Л. 29, док. 30]. В том же заседании в Королевском обществе в Лондоне, на котором был оглашен доклад Сименса (14.II.1867) о самовозбуждающемся последовательном генераторе постоянного тока, Уитстон (Wheatston) сделал доклад о самовозбуждающемся эл. генераторе постоянного тока с параллельным соединением обмоток возбуждения и якоря, названном впоследствии шунтовым генератором [Л. 29, док. 35]. В 1867 г. был взят, кроме того, патент Уайльдом на эл. генератор постоянного тока с двумя обмотками на якоре, одной с большим сопротивле-

нием для возбуждения электромагнитов, другой с малым сопротивлением для питания внешних приемников [Л. 29, док. 38]. Этот генератор был по существу своеобразным вариантом шунтового самовозбуждения.

Шунтовой генератор постоянного тока вначале не имел успеха, что же касается последовательного генератора, то, благодаря энергии Сименса, он стал поворотным пунктом в истории электромашиностроения. Достоинства шунтового генератора, который затем полностью вытеснил последовательный, были оценены много позже, — лишь в 1880 г.

Следует отметить, что С. А. Верлею [Л. 29, док. 40] принадлежит и идея компаундного самовозбуждающегося эл. генератора постоянного тока, 1877 г., получившая дальнейшее развитие в машинах Бреша (Brush), 1878 г. [Л. 29, док. 50], и в трудах Депре (Deprez), 1882 г. [Л. 29, док. 62]. При этом нужно подчеркнуть, что Верлей включал шунтовую обмотку, как и Уайльд, на самостоятельную обмотку якоря.

Изобретение кольцевого якоря с замкнутой спиральной обмоткой, присоединенной к коллектору. Это изобретение впервые было сделано Пачинотти в 1860 г. [Л. 29, док. 27]. Отметим, кстати, что коллектор был осуществлен Пачинотти в виде радиально расположенных пластин, а якорь был выполнен зубчатым; машина имела независимое возбуждение. Кольцевому якорю суждено было сделаться поворотным пунктом в истории эл. машин постоянного тока, но он обратил на себя внимание только через 10 лет, после вторичного изобретения, на этот раз Граммом в 1870 г. [Л. 29, док. 43 и 44]. Грамм придал коллекторным пластинам горизонтальное расположение (ныне имеющее преимущественное распространение) и указал на возможность применения при кольцевом якоря со спиральной обмоткой многополюсной магнитной системы; машина была выполнена с последовательным самовозбуждением.

Мероприятия для борьбы с вихревыми токами в железе якоря. Впервые мероприятие — выполнение якоря из пучка тонких железных проволок — было предложено и обосновано Синстеденом уже в 1849 г. Как следует из его статьи [Л. 29, док. 20], указания на необходимость выполнения якоря из пучка железной проволоки делались и раньше, но эта идея не была проверена и не получила правильной оценки. Позднейшие конструкторы также не оценили этой идеи, и вплоть до 1872 г. якоря эл. машин продолжали строить с массивными сердечниками. В 1871 г. Грамм взял патент на кольцевой якорь из проволоки, но ни в патенте, ни в своих заметках не обосновал его. Вторичное обоснование необходимости бороться с вихревыми токами в сердечнике якоря было дано в 1878 г. Брешом [Л. 29, док. 50], который предложил для этой цели расслаивать якорь на ряд дисков. Наиболее правильное техническое осуществление расслоения якоря на диски было сделано в 1880 г. Эдиссоном [Л. 29, док. 55], который тогда же указал, что толщина дисков якорного железа должна быть от  $\frac{1}{32}$  до  $\frac{1}{64}$  дюйма, т. е. от 0,8 до 0,4 мм.

В табл. 28 приведена сводка данных, которая иллюстрирует разрыв между предложениями и их практическим осуществлением.

б) Если исходить не из дат, когда впервые появлялась та или иная прогрессивная техническая идея, а из дат, когда эти идеи получали промышленное внедрение, то история эл. генераторов постоянного тока за время их самостоятельного развития (не связанного с развитием электродвигателей, т. е. по 1870 г.) может быть разбита на следующие периоды:

1) 1831—1863 гг. — разработка магнитоэлектрического генератора постоянного тока;

2) 1863—1867 гг. — разработка эл. генератора постоянного тока с электромагнитами, питаемыми от вспомогательной магнитоэлектрической машины;

3) 1867—1870 гг. — разработка самовозбуждающегося эл. генератора постоянного тока, в основном, с последовательным возбуждением.

За время, охватываемое первым периодом, должны быть отмечены две



Таблица 28

№ п/п	И д е я	Автор первого предложения и год возникновения идеи	Автор повторного предложения и год начала промышленного внедрения	Число лет от первого предложения до технического осуществления
1	Применение электромагнитов	Синстеден, 1851	Уайльд, 1863	12
2	Принцип самовозбуждения эл генератора постоянного тока	Хиорт, 1854	Уайльд, 1866 Верлей, 1866 Сименс, 1867 Уитстон, 1867	12
3	Кольцевой якорь со спиральной замкнутой обмоткой	Пачинотти, 1860	Грамм, 1870	10
4	Средства борьбы с вихревыми токами в сердечнике якоря	Синстеден, 1849	Грамм, 1872	23

даты Это, во-первых, 1832 г. — появление машины братьев Пикси (Pіxі) [Л. 29, док. 4], которая в течение многих лет вдохновляла многих конструкторов, и, во-вторых, 1856 г. — изобретение Вернером Сименсом сдвоенного Т-образного якоря, являвшегося до внедрения в практику кольцевого якоря наиболее передовой конструкцией [Л. 29, док. 26].

Время, охватываемое самостоятельным развитием электродвигателя постоянного тока (1822—1870 гг.), может быть разбито на два периода.

Первый период — с 1822 по 1834 г. — построение различных моделей, доказывающих возможность преобразования эл. энергии в механическую, не представляет особого интереса.

Второй период — с 1834 г. по 1867/1870 г. В 1834 г. Б. С. Якоби создал первый электродвигатель, примененный для практических целей [Л. 30, док. 6 и 9]. Двигатель имел мощность в 1 л. с. и приводил в движение на Неве против течения бот с 14 пассажирами. Это изобретение стимулировало появление ряда других конструкций электродвигателей, предназначенных для практических целей [Л. 30]. Некоторые из них, так же как и электродвигатель Якоби, выполнялись с вращательным движением, другие — с возвратно-поступательным движением, притом некоторые, как электродвигатель Якоби, с электромагнитами, другие — с постоянными магнитами.

В качестве источника для питания электродвигателей в течение обоих рассматриваемых периодов времени их развития служила гальваническая батарея. Экономические подсчеты показывали нерентабельность такого использования электродвигателей и, как казалось многим, бесперспективность их промышленного применения. Лишь к 1870 г., когда был полностью осознан принцип энергетической обратимости эл. машины и когда произошло окончательное слияние путей развития эл. генератора и электродвигателя, появилась идея питания электродвигателя от эл. генератора. С этого времени началось бурное развитие эл. машины постоянного тока как для генераторной, так и для двигательной работы.

в) В течение следующих 20 лет (с 1870 по 1891 г.), когда эл. машина постоянного тока развивалась уже как генератор и как двигатель, были изобретены все те отличительные особенности, которые сохранились и по настоящее время, но освоение этих изобретений практикой происходило во многих случаях с такими же разрывами во времени, как и раньше.

Здесь следует отметить следующие даты.

1) 1872 г. — изобретение Гефнер-Альтенеком (Hefner-Alteneck) и внедрение в практику однослойной барабанной обмотки [Л. 29, док. 47].

2) 1882 г. — изобретение Вестоном (Weston) и внедрение в практику двухслойной барабанной обмотки для гладкого якоря двухполюсной машины,

а также изобретение множественно-параллельной обмотки [Л. 29, док. 66]; изобретение Перри (Perry) простой последовательной обмотки

3) 1883 г. — изобретение Мероном и Кинодом (Meuron и Klnod) простой параллельной барабанной обмотки многополюсной машины [Л. 29, док. 73]; изобретение Мордеем (Mordey) уравнивающих соединений [Л. 29, док. 67] для уменьшения числа щеток многополюсной машины с простой параллельной обмоткой, не оправдавшее себя для предложенной цели, но нашедшее иное, весьма важное применение, начиная с 1892 г., для обеспечения успешной работы якорных обмоток.

4) 1884 г. — изобретение Менгесом (Menges) добавочных полюсов и компенсационной обмотки [Л. 29, док. 74] для целей улучшения коммутации.

Современные формы конструктивного выполнения добавочные полюсы получили к середине 90-х годов прошлого столетия, благодаря трудам ряда электриков они вошли в практику в качестве неотъемлемой части машины постоянного тока лишь в середине первого десятилетия XX века.

5) Независимо в следующем 1885 г. добавочные полюсы были изобретены Метером (Mather) [Л. 29, док. 76].

Компенсационная обмотка, как средство для улучшения коммутации, не смогла конкурировать с предложенными для той же цели более простыми и дешевыми добавочными полюсами, но вместе с ними она нашла себе применение (примерно со второго десятилетия XX века) при конструировании эл. машин для тяжелых условий работы, как средство борьбы с искажением магнитного поля машины при нагрузке.

Успеху применения добавочных полюсов способствовало в значительной степени применение в середине 90-х годов прошлого столетия искусственной вентиляции машин постоянного тока. Искусственная вентиляция применялась и раньше, но с введением добавочных полюсов она стала столь же неотъемлемой частью конструкции машин постоянного тока, как и добавочные полюсы.

6) 1885 г. — введение угольных щеток взамен ранее применявшихся медных щеток, последние сохранились ныне только в эл. машинах постоянного тока на низкие напряжения, 2—6 в (для целей гальванопластики, честь изобретения которой принадлежит Якоби). Это изобретение, повидимому, принадлежит Форбсу (G. Forbs), запатентовавшему его в 1885 г. Широкий почин в применении угольных щеток с 90-х годов прошлого столетия обычно связывают с именем Тюри (Thury) — автора передачи эл. энергии постоянного тока высокого напряжения, до 100 кв, посредством последовательных машин постоянного тока. Это нововведение быстро распространилось и вошло во всеобщее применение без особой борьбы, а потому до сих пор недостаточно оценено. Между тем, успехи в построении машин постоянного тока едва ли могли быть достигнуты без угольных щеток.

7) 1886 г. — обоснование братьями Гопкинсонами (John and Edward Hopkinson) [Л. 29, док. 77] метода расчета магнитной цепи эл. машин постоянного тока, замечившего собою ранние, крайне несовершенные методы, нередко приводившие к неудачным тяжелым конструкциям. Этот год следует по существу считать годом зарождения научной теории эл. машин постоянного тока.

8) 1891 г. — создание Арнольдом (Arnold), бывшим в то время доцентом Рижского Политехнического института, стройной теории обмоток эл. машин постоянного тока [Л. 31], которая положила конец кустарничеству в этой трудной области и этим способствовала быстрому прогрессу в области эл. машин постоянного тока.

г) В дальнейшем (после 1891 г.) прогресс шел за счет углубления теории и методов расчета эл. машины постоянного тока, развития методов экспериментального исследования ее свойств, улучшения качества применяемых материалов, совершенствования конструктивных деталей, а также методов производства. Результаты сказались в двух направлениях: в постепенном

росте мощности отдельной эл. машины постоянного тока, которая достигла нескольких тысяч киловатт, и в уменьшении так называемой удельной затраты материалов, т. е. расхода материалов на один киловатт полезной мощности эл. машины. Последнее особенно рельефно видно из сопоставления весов эл. машины одной и той же мощности и одной и той же скорости вращения, изготовленных одним и тем же заводом в разные годы (§ 21).

Следует, однако, не упускать из виду, что в странах, столь заинтересованных в экспорте, как Германия до первой мировой войны, стремление к уменьшению весов эл. машин, в особенности ходовых типов электродвигателей, происходило под сильным влиянием протекционистской таможенной политики государств, куда они ввозились, и где таможенная пошлина на эл. машины взималась обычно с единицы веса. Такое же влияние оказывала и необходимость для экспортирующих электромашиностроительных заводов уменьшить транспортные расходы, пропорциональные весу эл. машин. По этим причинам стремление к уменьшению весов эл. машин не всегда носило здоровый характер и нередко происходило не только за счет прогресса, но и за счет снижения коэффициента полезного действия эл. машин, а подчас и за счет уменьшения их эксплуатационной надежности. Во многих случаях уменьшение веса, а следовательно, и стоимости отдельных эл. машин, соответствовало стремлениям покупателей, для которых снижение первоначальных затрат на электрооборудование имело большое значение. Этого снижения они добивались, охотно идя на некоторое увеличение прямых эксплуатационных расходов.

После первой мировой войны экономическая конъюнктура значительно изменилась, и простые подсчеты показали, что во многих случаях для нового промышленного предприятия может оказаться более рациональным, в смысле уменьшения общих годовых расходов (т. е. уплаты процентов по капиталу и эксплуатационных расходов), пойти на приобретение более тяжелых, а следовательно, и более дорогих эл. машин, но имеющих зато большой коэффициент полезного действия.

Как известно, дореволюционная Россия почти не имела своей электропромышленности и удовлетворяла свой спрос на эл. машины, в основном, импортом, преимущественно из Германии. В советское время возникла и сильно развилась своя электропромышленность, которая накануне второй мировой войны почти полностью удовлетворяла внутренний спрос Советского Союза. Это развитие электромашиностроения также знаменуется неукоснительным стремлением к уменьшению весов эл. машин, а следовательно, и их габаритов (внешних размеров), но по другим причинам, чем за границей, а именно из-за дефицитности электротехнических материалов и необходимости лучше использовать производственные площади имевшихся электромашиностроительных заводов. Однако уже в тридцатых годах высказывалось мнение, что в советских условиях необходимо учитывать общий расход дефицитных материалов во всем народном электрохозяйстве, т. е. с учетом того увеличения затрат меди на генерирование, передачу и распределение эл. энергии, которое вызывается уменьшением значения к. п. д. эл. машин. После второй мировой войны этот вопрос вновь был поднят, он дебатировался в ряде статей, главным образом, в отношении электродвигателей переменного тока и трансформаторов, поскольку ныне в области большой электроэнергетики эл. машины постоянного тока имеют подчиненное значение.

### 3. Живучесть старых технических идей

Следует отметить, что старые принципы конструкций, даже при широком внедрении новых, более совершенных, не сразу сходили со сцены, и не сразу прекращались попытки новых решений в старых направлениях. Так, несмотря на появление и широкое применение с 1870 г. якоря с замкнутой обмоткой

по Пачинотти-Грамм, еще долго делались попытки строить кольцевые якоря с разомкнутыми обмотками, предложенные Брешом в 1878 г [Л. 29, док 50], а также многополюсные машины с разомкнутыми обмотками на якорях, представлявших развитие идеи сдвоенного Т-образного якоря двухполюсной машины Сименса.

Точно так же через 15 лет после изобретения Гефнером-Альтенек (1872) барабанного якоря, ныне являющегося общепризнанным исполнением, вновь вернулись к кольцевому якорю, при этом инициатором был тот же Гефнер-Альтенек, изобретатель барабанного якоря, и Гофман. Имея в виду увеличить момент инерции ротора, они выполнили машину с внешним якорем, так называемую «внутриполюсную машину постоянного тока». Благодаря такой конструкции им удалось избавиться от ременной передачи, которая при мощности в несколько сот киловатт занимала слишком много места, и перейти к непосредственному соединению эл. машины с тихоходной паровой машиной. При этом им удалось отказаться от устройства отдельного коллектора, объединив его с якорем путем очистки от изоляции верхнего слоя якорной обмотки. В течение ближайших 10 лет эта конструкция была преобладающей, а в первое время единственной, которая применялась для непосредственного соединения с паровой машиной, она находила себе применение вплоть до конца века, когда была вытеснена окончательно эл. машиной с барабанным якорем, обычного ныне внутрироторного исполнения.

Магнитоэлектрическая машина, которая с момента внедрения принципа самовозбуждения, казалось, окончательно утратила свое значение, даже в качестве возбудителя для электромагнитной машины (машины с электромагнитами), вновь стала привлекать к себе внимание после изобретения новых сплавов для постоянных магнитов, правда, лишь в ограниченной области небольших машин для специальных целей.

#### 4. Об особых типах эл. машин постоянного тока

Особое место в области эл. генераторов постоянного тока занял униполярный генератор. Прототип эл. генератора постоянного тока — «диск Фарадея» (1831 г) — был первой попыткой построения униполярной машины [Л. 29, док 1]. Уже со следующего года в машине братьев Пикси был сделан переход к выпрямлению переменного тока путем особых переключающих устройств — коллекторов.

Униполярной эл. машине постоянного тока многие видные электрики посвятили немало труда, в том числе московский профессор Б. И. Угримов, предложивший конструкцию дисковой униполярной эл. машины на большие скорости вращения, снабженной ртутным скользящим контактом [Л. 32].

В конструкции, предложенной Неггератом (Noeggerath) [Л. 33], униполярная эл. машина была выполнена в 1912 г в США на мощность около 2000 *квт* независимо двумя фирмами, фирмой Westinghouse и фирмой GE, и показала себя эквивалентной обычной коллекторной эл. машине постоянного тока [Л. 34]. Однако отсутствие каких-либо преимуществ перед последней закрыло перспективы дальнейшего развития униполярных эл. машин постоянного тока. Интерес к ним вновь возник в конце 30-х годов нашего столетия в области применения для электролиза. Однако этот повторный интерес к униполярным машинам постоянного тока скоро упал, так как с задачей генерирования больших постоянных эл. токов при низких напряжениях удалось справиться, конструируя хорошо изученные коллекторные эл. машины постоянного тока.

Также особое место заняла эл. машина постоянного тока с переменным полем. Впервые она была предложена Розенбергом в качестве эл. генератора постоянного тока при широком диапазоне изменения скорости вращения [Л. 35]. Позже она была применена в качестве эл.



генератора постоянного тока для электросварки, а еще позже — в качестве специального преобразователя постоянного эл. тока, получившего название *метадина*, и, наконец, накануне второй мировой войны — в качестве электромашинного усилителя, названного *амплидином*

Идея метадины принадлежит академику К. И. Шенферу [Л. 36], но самое название и разработка метадины для целей эл. тяги связаны с именем Пестарини (Pestarini) [Л. 37]. В настоящее время интерес к метадине ослабел. У нас их не строят.

Разработка амплидина была сделана в США Александерсоном и группой его сотрудников [Л. 38], амплидин в настоящее время получил широкое применение в схемах регулирования эл. машин.

Нужно упомянуть еще об эл. машине постоянного тока с третьей щеткой, предложенной Зенгелем, и об эл. машине постоянного тока с третьей щеткой и расщепленными полюсами для целей электросварки [Л. 39].

Все эти специальные конструкции находят ограниченное, специфическое применение, и когда говорят об эл. машине постоянного тока, то имеют в виду эл. машину общепромышленного исполнения, получившую свое оформление к 1891 г. и именуемую иногда, в отличие от прочих, эл. машиной постоянного тока обычного исполнения.

Говоря о развитии эл. машины постоянного тока, необходимо упомянуть еще о так называемой трехпроводной эл. машине постоянного тока, или об эл. машине с делителем напряжения Даливо-Добровольского, сыгравшей в свое время большую роль в развитии эл. сетей постоянного тока [Л. 40].

## 5. Время наибольшего торжества эл. машины постоянного тока и первые предвестники грядущей потери первенства

Первый международный конгресс электриков в Париже, в 1881 г., и приуроченная к нему первая в мировой истории Международная выставка электричества привлекли к себе всеобщее внимание и открыли перед широкими кругами техников и промышленников большие перспективы эл. машин и передачи и распределения эл. энергии, речь шла в то время, конечно, лишь о постоянном эл. токе. Особо выдающееся значение имели по своим последствиям доклады, сделанные на конгрессе французом Депре (Deprez) и немцем Фрейлихом (Frölich) о передаче эл. энергии на расстояние [Л. 29, док. 62 и 63], и промышленная установка, осуществленная Депре на выставке в Мюнхене в 1882 г., подтвердившая практическую возможность передачи эл. энергии постоянного тока на большое по тому времени расстояние в 57 км.

Следует отметить, что в технически отсталой царской России того времени были не только люди, стоявшие на высоте современных им знаний, но и ставшие пионерами во многих электротехнических областях и изобретениях. Так, еще за год до вышеупомянутого Первого международного конгресса электриков, состоявшегося в Париже в 1881 г., на котором Депре и Фрейлих сделали столь шумевшие доклады о передаче эл. энергии на расстояние, соображения на эту тему были изложены в только что возникшем в 1880 г. журнале «Электричество» профессором Лесного института Д. А. Лачиновым. А первая в мире установка, передающая эл. энергию на расстояние, была сделана в России, в Петербурге Ф. А. Пироцким в 1874 г., т. е. ранее Депре на 8 лет. Расстояние передачи было невелико, всего около 200 м, от локомотива в 6 л. с., но опыт был показательным и важным принципиально. К сожалению, как это нередко бывало, эти факты были забыты и только ныне вновь прочно установлены [Л. 41].

1882 г. был кульминационным пунктом в истории развития эл. машины постоянного тока. Вскоре, однако, вскрылись органические недостатки, присущие эл. машинам постоянного тока. Рост спроса на эл. энергию и рост дальности передачи требовали роста мощности и напряжения эл. машин постоян-



ного тока, а этим требованиям эл. машина постоянного тока не могла удовлетворить как по состоянию электроизоляционной техники того времени, так и из-за трудностей получения добротной коммутации, тогда еще не получивших полного практического разрешения. Эти обстоятельства пробудили, естественно, усиленный интерес к переменному току.

Первый удар постоянному току был нанесен в области применения эл. энергии для целей освещения в 1877 г., причем пионером в этой области был русский изобретатель П. Н. Яблочков, работавший тогда в Париже и создавший знаменитую электрическую свечу, получившую название «свечи Яблочкова». Для целей освещения на переменном эл. токе своими свечами Яблочков применил ряд последовательно включенных на первичной стороне трансформаторов с разомкнутой магнитной цепью. Позднее такая же система освещения на однофазном переменном эл. токе применялась Голардом (Gaulard) и Джибсом (Gibbs), которые пытались, но безуспешно, оспаривать приоритет в этом техническом решении у Яблочкова.

В 1885 г. были созданы первые промышленные трансформаторы с замкнутой магнитной цепью и было предложено включение их параллельно, что имело большие последствия. В Европе применение этой конструкции и параллельное включение трансформаторов было сделано Циперновским (Zipernowski), Дери (Déri) и Блати (Blathy), в США — Голардом и Джибсом.

С 1885 г. по 1891 г. происходило постепенное распространение для целей освещения однофазного переменного тока и совершенствование однофазных генераторов переменного тока, причем пионерскую работу в этой области сделал тот же П. Н. Яблочков [Л. 42].

Наличие трансформаторов не связывало напряжения передачи с напряжением ее отправного, а также приемного концов, а это делало свободным выбор напряжения генератора переменного тока на отправном конце электропередачи и у потребителя, на приемном конце передачи — неоценимое свойство, отсутствующее у генератора постоянного тока. Одновременно с этим происходило развитие и внедрение в жизнь постоянного тока для механических целей, так как переменный ток из-за отсутствия в то время соответствующих электродвигателей не мог найти применения.

Но новый удар постоянному току, и именно в этой области, уже готовился пытливыми умами, открывшими возможность постройки электродвигателей на принципе вращающегося магнитного поля, создаваемого многофазным переменным током. Этот принцип был известен Бейлею (Bailey) уже в 1879 г. В 1883 г. Дебре представил в Парижскую Академию Наук теорему, доказывающую образование вращающегося магнитного поля двумя токами одинаковой амплитуды, но сдвинутыми в пространстве и во времени на 90 эл. градусов. Эти работы прошли незамеченными, и принцип вращающегося магнитного поля обычно связывают с именами итальянца Феррариса (Ferraris), 1885 г., и югослава Тесла (Tesla), 1886 г., не только открывших его независимо друг от друга и, повидимому, независимо от вышеуказанных работ, но и сконструировавших первые основанные на этом принципе двухфазные двигатели переменного тока.

Опубликованная Феррарисом в 1888 г. работа об «Электродинамическом вращении, вызываемом переменными токами» дала мощный толчок многочисленным исследованиям к изысканию наиболее совершенной формы для основанного на этом принципе электродвигателя. Победителем в этом соревновании оказался русский, Доливо-Добровольский, предложивший и разработавший систему трехфазного тока и придавший уже к 1891 г. трехфазному короткозамкнутому асинхронному электродвигателю ту форму, в которой он существует и по настоящее время [Л. 43]. Этим кладется начало постепенному внедрению в промышленность трехфазного тока.

В последующие три десятилетия короткозамкнутый трехфазный асинхронный электродвигатель Доливо-Добровольского был по ряду причин

в значительной мере вытеснен несколько более дорогим и более требовательным в эксплуатации трехфазным асинхронным двигателем с кольцами, предложенным Доливо-Добровольским почти одновременно с трехфазным короткозамкнутым асинхронным двигателем. В эксплуатации все же этот несколько усложненный новый тип трехфазного асинхронного электродвигателя, а именно с кольцами, был неизмеримо проще и надежнее электродвигателя постоянного тока, обладающего коллектором.

## 6. Завоевание первенства трехфазным током

Сильный удар постоянному току со стороны переменного тока был нанесен в 1891 г. В этом году состоялось открытие первой дальней электропередачи трехфазного тока, сооруженной по инициативе известного немецкого деятеля в области техники Оскара Миллера (Miller). Передача происходила из местечка Лауфен на Неккере, притоке Майна, в город Франкфурт на Майне, на расстояние 175 км. Трехфазный генератор, установленный в Лауфене, был мощностью в 300 л. с., имел частоту 30—40 гц, напряжение 55 в, последнее при помощи трехфазного трансформатора, сконструированного Доливо-Добровольским, повышалось до 30 000 в, а во Франкфурте на Майне другим трансформатором понижалось с 30 000 в до напряжения в 65 в, при котором питались осветительные приборы и трехфазный короткозамкнутый асинхронный электродвигатель Доливо-Добровольского; мощность двигателя была 100 л. с., число полюсов 8.

Успешная работа этой установки предрешила торжество трехфазного тока в области генерирования, передачи, распределения и промышленного применения эл. энергии для двигательных целей. В течение, примерно, десятилетия постоянный ток продолжал еще бороться за первенство, но с начала нового XX века весы окончательно склонились в сторону трехфазного тока, несмотря на появление выдающихся по идее и совершенных по техническому выполнению дальних электропередач постоянного тока напряжением до 110 000 в с использованием на отправном конце передачи последовательного включения ряда последовательных генераторов постоянного тока, а на приемном конце ряда последовательных электродвигателей [Л. 44]. Эти установки, связанные с именем швейцарца Тюри (Thury), блестяще работали, но не представляли той гибкости использования эл. энергии, которую благодаря наличию трансформаторов обеспечивал трехфазный ток, и той простоты ухода и надежности в эксплуатации, которые присущи трехфазному асинхронному электродвигателю Доливо-Добровольского.

## 7. Период торжества трехфазного тока и намечающийся частичный реванш со стороны постоянного тока

К началу нового столетия выяснились с полной несомненностью для широких промышленных кругов громадные экономические выгоды, связанные с концентрацией производства эл. энергии на мощных эл. станциях, получивших тогда название центральных эл. станций, или эл. станций общественного пользования, в отличие от эл. станций отдельных фабрично-заводских предприятий, называвшихся эл. блокстанциями. Это повлекло за собой все множившиеся случаи отказа фабрично-заводских предприятий от эл. блокстанций и соответствующий рост эл. станций общественного пользования, расположенных в промышленных районах и стремившихся к расширению обслуживаемой местности, что было возможно, конечно, лишь при пользовании трехфазным током.

С начала второго десятилетия этого века явно наметилась тенденция сооружения эл. станций для снабжения эл. энергией целых районов, так называемых районных эл. станций, как в промышленных центрах, так и в местах

естественных энергетических ресурсов, какими являлись не только каменный уголь, но и «белый уголь» — вода, бурый уголь, торф и, наконец, сланцы. Стали разрабатываться и осуществляться планы электрификации целых государств, и возникла проблема воссоединения (интерконнекции) в единую мощную сеть высокого напряжения отдельных районных эл систем, в связи с чем возникла проблема устойчивости их совместной работы. Эти планы разрабатывались и осуществлялись на базе трехфазного тока и утвердили на долгие годы торжество последнего над постоянным током в области генерирования и передачи эл энергии.

Надлежит, однако, отметить, что уже в годы наибольшего торжества трехфазного тока стали раздаваться голоса, предсказывавшие возможность реванша со стороны постоянного тока, если не в области генерирования эл. энергии и снабжения ею близлежащих местностей, то в области передачи энергии на дальние расстояния и межрайонной интерконнекции. И характерно, что первым в этом духе высказался Дюливо-Добровольский [Л. 43], с именем которого, как указывалось выше, связана первая дальняя электропередача трехфазного тока (из Лауфена на Нёккере во Франкфурт на Майне). Надежды на такой реванш связываются в настоящее время, в основном, с успехами, которые были достигнуты в области ртутных выпрямителей и в удачном разрешении проблемы инвертирования постоянного тока в трехфазный при помощи так называемых управляемых ртутных выпрямителей. Ожила одно время и идея Тюри [Л. 44], возникали и другие предложения, как то дуговой выпрямитель Маркса (E. Marx), контактный выпрямитель фирмы Сименс-Шуккерта. За годы второй мировой войны значительные успехи в области дальних электропередач постоянного тока, оборудованных управляемыми ртутными выпрямителями, были достигнуты в Германии, в Швейцарии и в США [Л. 45].

## **8. Борьба постоянного тока за сохранение определенных позиций и новые симптомы**

В связи с вышеозначенными общегосударственными планами электрификации целых государств, осуществляемыми по системе трехфазного тока, естественным было постепенное вытеснение постоянного тока и из области широкого промышленного применения эл энергии для механических целей. Однако в ряде отраслей, в особенности там, где требуется строгое поддержание постоянства скорости вращения или широкая экономическая регулировка скорости электродвигателей (эл. тяга, прокатка и ряд других областей) или имеется сильно меняющаяся скорость вращения эл генераторов (освещение поездов, авиация), эл машина постоянного тока до последнего времени прочно удерживала свое первенствующее место, обладая ценными, пока непревзойденными преимуществами перед эл машиной переменного тока в смысле регулирования скорости вращения и напряжения.

В некоторых случаях эл машины постоянного тока находят солидную поддержку в аккумуляторах постоянного тока, так как способов аккумуляции эл. энергии переменного тока пока не существует. Нужно отметить, однако, что в последние годы в ряде ответственных применений эл. машин, где ранее использовали исключительно постоянный ток, намечается успешная конкуренция трехфазного тока, но перспективы пока еще не вполне ясны, и можно думать, что окончательное вытеснение постоянного тока трехфазным из всех областей промышленного применения произойдет очень нескоро, если вообще произойдет когда-либо.

## ЛИТЕРАТУРА

1. А н р и П у а н к а р е, О некоторых общих теоремах, касающихся электротехники, «L'Eclairage électrique», 1907, т. 50, стр. 293.
- 2 Г Б а р к г а у з е н, Электрические колебания, 1907.
- 3 В. Ф М и т к е в и ч, Физические основы электротехники, Кубуч, 1932
- 4 Г. А. А к и м о в - П е р е т ц, Проблема бесколлекторной машины постоянного тока, «Электричество», 1924, стр. 381.
- 5 В А. Т о л в и н с к и й, Электротехническая промышленность иностранных государств накануне мировой войны, Петроград, 1919
6. М А. Ш а т е л е н, Международная Электротехническая Комиссия, «Электричество», 1911, стр. 394
7. Сборник электротехнических правил и норм, Главэлектро ВСНХ СССР, ГИЗ, 1927
- 8 Электрооборудование для энергетических установок, Сборник общесоюзных стандартов, ГЭИ, 1948.
9. А. Е. А л е к с е е в, Конструкция электрических машин, ГЭИ, 1949.
- 10 Б. М. Т а р е е в, Электротехнические материалы, ГЭИ, 1952
11. Н. М Ф е д о р о в, Х Г Х у с н у т д и н о в, Оксидация динамной стали, «Вестник электропромышленности», 1950, № 1.
- 12 Н В В и н о г р а д о в, Технология производства электрических машин, ГЭИ, 1948.
- 13 A r n o l d - l a C o u r, Die Gleichstrommaschine. 1. Bd Theorie und Untersuchung, 1919, 3 Aufl Neudruck, 1923. 2 Bd. Konstruktion, Berechnung und Arbeitsweise, 1927, 3 Aufl. (Имеется русский перевод обоих томов, Москва, 1931.)
- 14 R. R i c h t e r, Ankerwicklungen fur Gleich- und Wechselstrommaschinen, 1920, Berichtiger Neudruck, 1922
15. F. P u n g a, Gegenseitige Beeinflussung von Hiltis- und Compoundwicklung in Gleichstrommaschinen, «Е. и М », 1911, стр. 306
- 16 В Т. К а с ь я н о в, Реакция якоря машины постоянного тока, «Известия электропромышленности», 1940, № 2
17. К. И Ш е н ф е р, Коммутация в машинах постоянного тока, Труды Гос. Эксперимент Электротехнич ин-та, вып. 1, 1924
18. E R z i h a und J S e i d e n e r, Starkstromtechnik, Bd I, стр. 503—504.
19. В. Т. К а с ь я н о в, Регулировка дополнительных полюсов машин постоянного тока, «Электричество», 1934, № 20; 1935, № 1.
20. Г. К. Ж е р в е, Промышленные испытания электрических машин, ГЭИ, 1950
- 21 P G i r a u l t, Sur la commutation dans les dynamos à courant continu, «Bull. Soc Int El», Mai 1898, стр. 183.
- 22 J F i s c h n e r - H i n n e n, Über die Funkenbildung on Gleichstrommaschinen, «ETZ», 1898, стр. 850, 867
- 23 E A r n o l d und G M i e, Über den Kurzschluss der Spulen und die Kommutation des Stromes eines Gleichstromankers, «ETZ», 1899, стр. 97, 136, 150.
24. R. R i c h t e r, Elektrische Maschinen, Erster Band, Allgemeine Berechnungselemente, Die Gleichstrommaschine, 1924. (Имеется русский перевод, ОНТИ, 1935.)
- 25 S i l v a n u s T h o m p s o n, Dynamo-Electric Machinery, v. I, II.
- 26 А. H o l t z, Die Schule des Elektrotechnikers, Bd. II, изд. М Schäfer.
- 27 В G. L a m m e, The Development of the Direct Current Generator in America, «El Journal», 1915, стр. 65, 114, 164, 212.
- 28 K a r l T r e t t i n, Die ersten funfundzwanzig Jahre in Theorie und Berechnung der Dynamomaschine, «Wiss Veroff. Siemens Werke», XXI, Bd, 1 Heft, 1942.
- 29 Д В. Е ф р е м о в и М И Р а д о в с к и й, Динамомашин в ее историческом развитии, Изд. АН СССР, 1934
- 30 Д В. Е ф р е м о в и М И Р а д о в с к и й, История электродвигателя, Изд. АН СССР, 1935.
31. E A r n o l d, Die Ankerwicklungen der Gleichstrom-Dynamomaschinen, изд. Springer и R Oldenburg, 1891

32. Б. И. Угрюмов, Униполярная машина системы автора, «Униполярные машины и применение постоянных магнитов в электромашиностроении», Изд. АН СССР, 1940
33. N o e g g e r a t h, Acyclic (Homopolar) Dynamos, «Tr. AIEE», 1905, стр. 1
34. В. Г. Ламме, Development of a Successful Direct Current 2000 kW Unipolar Generator, «Tr. AIEE», 1912, стр. 1811
35. Е. Р. Розенберг, Die Gleichstrom-Querfeldmaschine, изд. J. Springer, 1928
36. К. И. Шенфер, Об одной схеме регулирования скорости тяговых двигателей постоянного тока, «Электричество», 1936, № 7, стр. 14
37. J. P e s t a r i n i, Les metadynes entre elles et leur dérivées, «RGE», 1930, т. 27, стр. 355, 395; т. 28, стр. 813, 851, 900
38. А. Фишер, Design Characteristics of Amplidyne Generators, «GER», 1940, № 3, стр. 107
39. В. Т. Касьянов, Сварочный генератор с самовозбуждением, «Электричество», 1930, № 14, стр. 591
40. М. О. Доливо-Добровольский, Машина постоянного тока для трехпроводной сети, «ETZ», 1893, стр. 323—324.
41. Ф. А. Пирцкий, О передаче работы воды, как двигателя, на всякое расстояние посредством гальванического тока, «Инженерный журнал», 1877.
42. М. А. Шателен, Русские электротехники второй половины XIX столетия, ГЭИ, 1949, стр. 65—149.
43. М. О. Доливо-Добровольский, Избранные труды, ГЭИ, 1948
44. R. T h u r y, Kraftubertragungen auf grosse Entfernungen durch hochgespannten Gleichstrom, «ETZ», 1930, стр. 114
45. Я. М. Червоненкис, Передача энергии постоянным током, Изд. АН СССР, 1948.
-

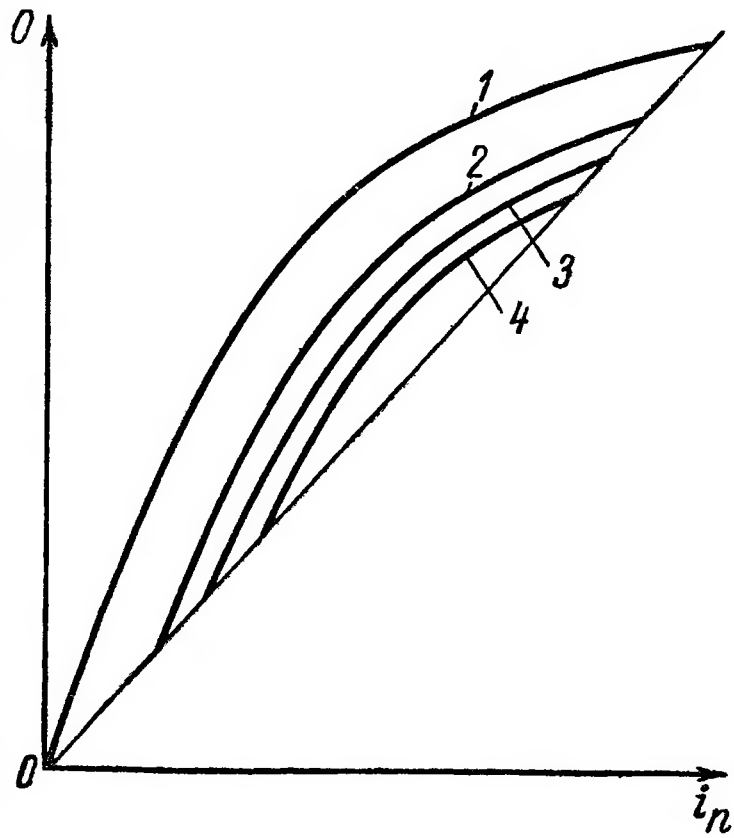


## АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Ампервитки зазора 103  
 — зубцового слоя 98, 109  
 — определение 91  
 — полюсного башмака 111  
 — — сердечника 106  
 — — — с быстро насыщающимися участками 113  
 — стыка сердечника и ярма 111  
 — якоря, поперечные 228  
 — — продольные 227  
 — ярма 106  
 Аппаратура пускорегулирующая 351  
 Арнольд 94, 116, 228, 281, 288, 397, 441
- Бандажи проволоочные 62  
 — — немагнитные 64  
 Барабанная обмотка якоря 122  
 — — — получение из кольцевой 162  
 Безреостатный пуск двигателей 354  
 Био—Савара закон 331  
 Бракеты 37, 76
- Вал машины 34  
 Вентиляторы машин 34, 443  
 Вентилятор центробежный 452  
 Вентиляционные каналы 445  
 Вентиляция машины 43, 443, 444  
 Вихревые токи 240  
 Возбудитель 39  
 Возбуждение двухступенчатое 33  
 — независимое 39  
 — параллельное 39  
 — последовательное 39  
 Волновая обмотка 168  
 Вращающий электромагнитный момент 331
- Гистерезис 301, 395  
 Гистерезисная постоянная 396  
 Главная магнитная цепь 233
- Двигательный режим 234  
 Дисковый якорь 123, 171  
 Добавочные полюса, влияние на поле основных 224  
 — — двигателя 235  
 — — для улучшения коммутации 222  
 — — компаундирующее влияние 226, 235  
 — — коэффициент рассеяния 283  
 — — поле 83  
 — — размеры 282  
 — — расчет магнитной цепи 281  
 — — регулирование 280  
 — — соединение катушек 226
- Разжимы, коробки выводов 37
- Индуктивность обмотки якоря 351
- Индуктивный шунт 280  
 Индукция в полюсном сердечнике 107  
 — в ярме 107  
 — под добавочным полюсом 282  
 — электромагнитная, закон 51  
 Искрение, визуальная оценка 249  
 — коммутационное, причины 288  
 — на коллекторе, причины 248  
 Искусственно замкнутая последовательная обмотка 198
- Касьянов В. Т. 231  
 — метод наладки коммутации 278  
 Катушки полюсные 419  
 Качание 374  
 Класс изоляции 416  
 Колебания вынужденные 371  
 — крутильные 373  
 — при совместной работе машин 371  
 — свободные 374  
 Коллектор 34, 36, 129  
 Коллекторные пластины, изоляция 70  
 Кольцевой якорь 123  
 — — обмотки 122, 125, 172  
 Коммутация, влияние зубчатости якоря 266  
 — — типа обмотки 262  
 — — ширины щетки 261, 273  
 — диаграмма 251  
 — замедленная 257  
 — классическая теория 288  
 — наладка 278  
 — общий случай 257  
 — период 269, 290  
 — проблема 249  
 — прямолинейная 254  
 — сопротивлением 255  
 — гока 217  
 — ширина зоны 269  
 — уравнение 253  
 — ускоренная 257  
 Компенсационная обмотка 238, 239, 294  
 Контакт скользящий 28  
 Коэрцитивная сила 301, 327  
 Коэффициент аэродинамический 448  
 — заполнения 58, 98, 107  
 — зубчатости зазора 105, 281  
 — конструкционный 38  
 — магнитного рассеяния 115  
 Коэффициент полезного действия,  $k_{пд}$  375, 403  
 — — генератора 377  
 — — двигателя 376  
 — — — определение 406, 407, 408  
 — полюсной дуги 287  
 — рассеяния 233  
 — температурный 388, 415  
 — трения в подшипниках скольжения 384  
 — — щеток о коллектор 297, 381  
 — — увеличения потерь 394  
 Кратность замыкания обмотки 180
- Кривая намагничивания электро-технической стали 89, 101  
 — — добавочных полюсов 287  
 — — машины 108  
 — — устойчивая 114, 115  
 Критическая скорость вращения 318  
 Круговой огонь 239  
 — — меры борьбы и средства предотвращения 239, 290  
 Крутильные колебания вала 373
- Левая последовательная обмотка 144  
 Ленц Э. Х. 330  
 Леонарда система 358, 359  
 Линейная нагрузка якоря 219  
 Лобовые части обмотки 126
- Магнитная проницаемость 89  
 — система 35  
 — трубка 94, 96  
 — цепь, закон 88, 90  
 Магнитное поле в зазоре 103  
 — рассеяние полюсов 93  
 — — коэффициент 93, 115, 116  
 — сопротивление 89  
 Магнитные линии 87  
 Магнитный поток в зазоре, кривая распределения 93  
 — регулятор 326  
 Магнитодвижущая сила 90  
 Магнитоэлектрическая машина 33  
 Материалы активные 38, 52  
 Машина взрывобезопасная 43  
 — газонаполненная 43  
 — герметическая 43  
 — защищенная 41  
 — неявнополюсная 31  
 — открытая 41, 42, 43  
 — параллельная 40  
 — последовательная 40  
 — смешанная 39, 40, 41  
 — с поперечным полем 33  
 Многократная множественная параллельная обмотка 151  
 — — последовательная обмотка 156  
 Многократно-однократная множественная параллельная обмотка 154  
 — — — последовательная обмотка 157  
 Множественная параллельная обмотка 151, 155  
 — последовательная обмотка 158  
 Момент вращающий 236  
 Мощность одной машины (предельная) 46
- Нагревание катушек полюсов 440  
 — коллектора 442  
 — кривая универсальная 427  
 — машины при кратковременной работе 437  
 — — — повторно кратковременной работе 438

- Нагревание машины при продолжительной работе 436  
 — якоря 441  
 Наконечник полюсный 32, 95  
 Намагничивание, интенсивность 114  
 Направление вращения 234, 323, 331, 408  
 Нейтраль 127  
 Несимметричные обмотки 196  
 Номинальные величины 48  
 Неявнополюсная машина 31
- Обмотка возбуждения 36, 81  
 — вспомогательная 28, 31  
 — компенсационная 36, 85  
 — основная 28, 31  
 — якоря 63  
 — — диаметральной 163  
 — — замкнутая 32, 122  
 — — изоляция 65  
 — — кольцевая 122  
 — — комбинированная множественная 160  
 — — кратность замыкания 180  
 — — простая параллельная 134  
 — — равносекционная 181  
 — — разомкнутая 32  
 — — с двумя коллекторами 193  
 — — сравнение 212  
 — — ступенчатая 181  
 — — схемы 185, 186  
 — — типы 122, 124  
 — — хордовая 163  
 — — число пар параллельных ветвей 138  
 Обозначения обмоток 349  
 Обратимость электрической машины 22, 27, 29, 51  
 Остаточная э. д. с 301  
 Остаточный магнетизм 318, 323
- Падение напряжения под нагрузкой 307  
 — — — щеткой 280, 281, 296, 305  
 Пазы якоря, форма 61  
 — — количество на полюс 267  
 Параллельная работа генераторов 364  
 Пеглевая обмотка 167  
 Подшипники 38  
 Поле магнитное машины 94  
 — — — при наличии добавочных полюсов 223  
 — — — — компенсационной обмотки 239  
 Полюса главные (основные) 34, 36, 80  
 — добавочные 34, 36  
 — число пар 137  
 Полюсная дуга, коэффициент 104, 126, 287  
 Полюсный башмак (наконечник) 32, 36, 80, 95  
 Полярность добавочных полюсов 235  
 — щеток 169  
 Потери вентиляционные 386  
 — в обмотках (основные) 389  
 — — — возбуждения 389  
 — — обмотке добавочных полюсов 389  
 — — — якоря 389  
 — в стали 58  
 — гистерезисные 396, 399  
 — (падение) давления воздуха 448  
 — добавочные 378  
 — — в обмотке якоря 392  
 — — — пластинах коллектора 395  
 — — магнитные 403  
 — коммутационные 393  
 — магнитные, влияние механической обработки 400
- Потери магнитные в зубцах 402  
 — — — сердечнике якоря 401  
 — — — якорю 401  
 — — — удельные, понятие 395  
 — на вихревые токи 56, 397  
 — — трение в подшипниках 382  
 — — — щеток о коллектор 381  
 — основные 378  
 — подразделение 377, 403  
 Поток магнитного рассеяния полюсов 93, 116  
 Правило левой руки (Флеминга) 331  
 — правой руки 81  
 Применение двигателей, области 348  
 Проводимость магнитная пазовой части 270  
 — — якоря 59  
 — потоков рассеяния лобовых частей 277  
 — — — главных полюсов 116, 117  
 Прокладки под полюсными сердечниками 115, 327  
 Пульсации магнитного потока 61  
 — э д с 176  
 Пуск безреостатный 354  
 — реостатный 353
- Равносекционные обмотки 181  
 Рассеяние главных полюсов 115  
 — добавочных полюсов 284  
 — магнитное суммарное 116  
 — потоки внешние 121  
 — — внутренние 120  
 Реактивная э. д. с 258, 282, 289  
 Реакция якоря 215, 306  
 — — генератора 227  
 — — двигателя 234  
 Регулирование скорости двигателей 356  
 Резонанс частот колебаний 373  
 Рихтер 96, 211, 289
- Саморазмагничивание генератора 325  
 Сдвиг нейтрали 216, 234  
 — щеток 225, 234, 374  
 Секция обмотки якоря 126  
 Скорость вращения двигателей 235  
 — окружная 127  
 Симметрия обмоток 183  
 — — волновых 190, 192  
 — — петлевых 187, 189  
 Сопротивление аэродинамическое 449  
 — удельное 415  
 — электрическое обмотки 388  
 Стабилизированные двигатели 347  
 Станина 35  
 Старение изоляции 416  
 Столетов А. Г. 396  
 Ступенчатая обмотка 181  
 Схемы включения двигателей 349  
 — внутреннего соединения машин 350
- Температура 413, 415  
 Теплорассеяние конвекцией 420  
 — лучеиспусканием 420  
 Траверса 37  
 Трение щеток 297  
 Треугольник характеристический 305  
 Тюри система 364, 369
- Униполярная машина 31  
 Уравнение движения двигателя 385  
 Уравнительная шина 367
- Уравнительные соединения 64, 184, 211  
 — — II рода 156, 189, 198, 204, 206  
 — — I рода 140, 202  
 Уравнительный шаг 140  
 Устойчивость магнитная 326, 343, 344
- Фильтр радиопомех 133  
 Флеминга правило 331  
 Форма кривой основного поля 219  
 — — поля якоря 220  
 — — результирующего поля 221  
 — — поля при добавочных полюсах 223
- Характеристика внешняя 305, 311, 314, 321  
 — короткого замыкания 309, 311  
 — механическая (двигателя) 334  
 — моментная (двигателя) 334  
 — нагрузочная 302  
 — регулировочная 308, 317  
 — скоростная (двигателя) 334  
 — холостого хода генераторная 108, 300  
 Характеристики генератора параллельного 312, 314, 317  
 — — последовательного 310  
 — — смешанного 319  
 — двигателя параллельного 337, 340  
 — — последовательного 343, 345  
 — — смешанного 346  
 Характеристическое уравнение генератора 299  
 — — двигателя 333
- Число коллекторных пластин 194  
 Частота э д с обмотки якоря 137
- Шаг обмотки, обобщенная формула 180  
 — — по коллектору 130  
 — — — полю 180  
 — — — якорю 129  
 — — частичный 170, 181  
 Шихтованная магнитная система 240  
 Шихтованный сердечник 240  
 — якорь 397  
 Шунт длинный, короткий 40, 41
- Щетки 50  
 — зоны установки 73  
 — искрение 297  
 — комплект зонный 36  
 — коэффициент перекрытия 273  
 — наклонные 297  
 — сорта 295  
 — угольные 73  
 — число их 265  
 — ширина 211  
 Щеткодержатели 37, 74, 76  
 Щиток заводский 48  
 Щиты подшипниковые 79
- Э д с. коммутирующая 261  
 — на коллекторе 129, 133  
 — обмотки якоря 128, 175  
 — пульсации 176  
 Электромагнитный момент 236
- Якорная звезда (колесо остова) 59  
 Якорное деление 129  
 Якорь 34  
 — двойной 32  
 Ядро 34

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть
134	12 снизу	102 и 103	101 и 102
173	19 сверху	$\Phi^2 \frac{\omega_s s}{a}$	$\Phi \frac{2 \cdot \omega_s s}{a}$
314	Фиг. 251	Напечатано ошибочное клише	
337	Подпись под фиг 272	при отсутствии реакции якоря и $R_\Sigma = \text{const}$	при $R_\Sigma = \text{const}$

В. А Толвинский